Организаторы

Юбилейной конференции Национального комитета РАН
по тепло- и массообмену
и
XXI Школы-семинара
молодых ученых и специалистов
под руководством академика РАН А.И. Леонтьева

Российская академия наук.
Отделение энергетики, механики, машиностроения
и проблем управления

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого

Объединенный институт высоких температур РАН

Национальный комитет РАН по тепло- и массообмену

EXTENDED ABSTRACTS

of both
the Jubilee conference

FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS IN HEAT AND MASS TRANSFER

organized by the Russian National Committee
of Heat and Mass Transfer
and

the XXI School-Seminar of Young Scientists and Specialists under supervision of Professor A.I. Leontiev, Academician of the Russian Academy of Science

PROBLEMS OF GAS DYNAMICS, HEAT AND MASS TRANSFER IN POWER PLANTS

Volume 2

May 22-26, 2017
Saint Petersburg

Москва Издательский дом МЭИ 2017

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Юбилейной конференции Национального комитета РАН
по тепло- и массообмену

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

и

XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева

ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Том 2

22–26 мая 2017 года
Санкт-Петербург

Москва Издательский дом МЭИ 2017

УДК 536.24+621
ББК 31.31
Т 299

Т 299 **Тезисы** докладов Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» и XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках» (22—26 мая 2017 г., Санкт-Петербург): В 2 т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. — 308 с.

ISBN 978-5-383-01123-2
ISBN 978-5-383-01125-6 (Том 2)

Представлены тезисы лекций и докладов по тепло- и массообмену в дисперсных и пористых средах, по методикам экспериментов, численному моделированию, по конвективному теплообмену, теплообмену при фазовых превращениях, интенсификации процессов теплообмена, по тепломассопереносу при химических реакциях и др.

Тезисы печатаются в авторской редакции методом прямого репродуцирования с авторских оригиналов.

Научное издание

Тезисы докладов
Юбилейной конференции Национального комитета РАН
по тепло- и массообмену
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕПЛОМАССООБМЕНА
и
XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов
под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева
ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Корректор *Г.Ф. Раджабова*
Верстка *М.Н. Маркиной*

Формат 60×84/16	Печать офсетная	Подписано к печати 17.04.2017
Усл. печ. л. 17,9	Тираж 300 экз.	Заказ

АО «Издательский дом МЭИ», 111024, Москва, ул. 2-я Кабельная, д. 2
Отпечатано в АО «Т8 Издательские Технологии», Москва, Волгоградский пр-т, д. 42, корп. 5

© Авторы, 2017
© Национальный комитет РАН
по тепло- и массообмену,
составление, 2017
© АО «Издательский дом МЭИ», 2017

ISBN 978-5-383-01123-2
ISBN 978-5-383-01125-6 (Том 2)



Дорогие друзья и коллеги!

Трудно себе представить, что наша Школа молодых ученых отмечает свой сорокалетний юбилей.

Мне кажется, что за прошедшие годы, нам удалось создать удивительную вещь – постоянно действующую Школу–семинар молодых теплофизиков. Удивительно то, что, несмотря на потрясения и катаклизмы, выпавшие на долю нашей страны, и особенно научного сообщества, не было пропущено ни одного планового заседания Школы.

Мы гордимся многими участниками первых школ, которые стали известными учеными и организаторами отечественной науки.

21-я школа проводится в прекрасном городе Санкт-Петербурге, городе моего детства.

На смену ветераном приходит молодежь, владеющая современными знаниями и современными гаджетами. Но, как сказал один умный человек, навыков и умения – недостаточно, требуется еще и питательная среда, которая возникает на каждой нашей Школе-семинаре.

Особую благодарность выражаю коллегам из Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, а именно ректору академику Андрею Ивановичу Рудскому, проректору член-корр. РАН Виталию Владимировичу Сергееву, академику Михаилу Петровичу Федорову, заведующему кафедрой Евгению Михайловичу Смирнову, молодым и незаменимым доцентам в лице Николая Георгиевича Иванова и всему составу Организационного комитета.

Желаю всем участникам Школы крепкого здоровья, оптимизма и дальнейших творческих свершений.

Академик А.И. Леонтьев

ЮБИЛЕЙНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И СЕКЦИИ XXI ШКОЛЫ-СЕМИНАРА

Юбилейная конференция Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА»

Сопредседатели
член-корр. РАН, профессор В.В. Сергеев
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)
член-корр. РАН, профессор А.Ю. Вараксин
(Объединенный институт высоких температур РАН, Москва)
ученый секретарь к.т.н. Е.Э. Китанина
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

Памяти иностранного члена РАН, профессора Д.Б. Сполдинга

Сопредседатели
академик РАН А.И. Леонтьев
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
профессор С.З. Сапожников
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

КРУГЛЫЙ СТОЛ «2017 — год экологии»

Сопредседатели
академик РАН М.П. Федоров
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)
член-корр. РАН В.В. Клименко
(Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва)

СЕКЦИЯ 1 Фундаментальные проблемы тепло- и массообмена при однофазной конвекции

Сопредседатели
профессор Е.М. Смирнов
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)
профессор В.И. Терехов
(Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск)
к.ф.-м.н. А.В. Гарбарук
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

СЕКЦИЯ 2 Тепло- и массообмен в многофазной среде

Сопредседатели
член-корр. РАН А.Н. Павленко
(Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск)
член-корр. РАН Б.Г. Покусаев
(Московский политехнический университет)
профессор В.В. Ягов
(Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва)
к.ф.-м.н. А.С. Суртаев
(Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск)

СЕКЦИЯ 3 Сложный радиационный теплообмен и горение

Сопредседатели

профессор А.Ю. Снегирев
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого),
д.т.н. Л.А. Домбровский
(Объединенный институт высоких температур РАН, Москва)
к.т.н. А.Г. Здитовец
(НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)

СЕКЦИЯ 4 Методы экспериментальных исследований процессов тепло- и массообмена

Сопредседатели

профессор С.З. Сапожников
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого),
профессор В.Г. Свиридов
(Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва)
д.т.н. А.В. Митяков
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

СЕКЦИЯ 5 Прикладные проблемы тепломассообмена в перспективных энергетических установках

Сопредседатели

член-корр. РАН Ю.К. Петреня
(ОАО «Силовые машины», Санкт-Петербург)
профессор О.О. Мильман
(НПВП «Турбокон», Калуга)
к.ф.-м.н. М.С. Макаров
(Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск)

Научный и организационный комитеты

Юбилейной конференции Национального комитета РАН
по тепло- и массообмену
и
XXI Школы-семинара
молодых ученых и специалистов
под руководством академика РАН А.И. Леонтьева

благодарят за финансовую поддержку:

Российский фонд фундаментальных исследований
(грант 17-08-2008917 г)

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

профессора
Булата Искандеровича Нигматулина

Секция 3



Сложный, радиационный теплообмен и горение

УДК 62-643; 544.332.3; 662.613

И.С. Ануфриев, С.С. Арсентьев, Е.П. Копьев, О.В. Шарыпов*

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
*e-mail: kopyev.evgenit@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРИСУТСТВИИ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

В настоящее время все большее внимание уделяется вопросам экологической безопасности, 2017 год неслучайно объявлен в России годом экологии. Важной задачей является утилизация большого объема накопленных на предприятиях теплоэнергетики и других отраслей жидких углеводородных отходов (отработанные масла и смазочные жидкости, некондиционные остатки топлив, отходы нефтепереработки и др.), которые не находят в настоящее время широкого практического применения и представляют значительную опасность техногенного загрязнения окружающей среды. Широкому использованию подобных углеводородов для замещения качественных видов органического топлива препятствует несоответствие существующих технологий экологическим требованиям, их недостаточная энергоэффективность, проблемы, связанные с воспламенением топлив, коксованием поверхностей и др. В связи с этим представляют интерес поиск и научное обоснование новых способов сжигания некондиционных жидких углеводородов, разработка и создание энергетических установок, качественно утилизирующих такие топлива с получением тепловой энергии.

Одной из перспективных технологий является сжигание низкокачественных углеводородных топлив в присутствии перегретого водяного пара. Предварительные исследования, проведенные в ИТ СО РАН на оригинальных автономных горелочных устройствах (рис. 1) мощностью 10—50 кВт [1, 2], показали, что при подаче в зону горения струи перегретого водяного пара горение жидких углеводородов резко интенсифицируется, обеспечивается устойчивое воспламенение при высоком расходе топлива. В процессе газификации образуются такие промежуточные компоненты, как CO, H_2, OH. Показано, что сажа в продуктах сгорания практически отсутствует. Такой способ «бессажного» сжигания [3] может оказаться перспективным для утилизации низкокачественных жидких углеводородных топлив и горючих производственных отходов с получением тепловой энергии.

В данной работе на примере отработанного картерного масла экспериментально исследованы характеристики сжигания жидкого углеводородного топлива в горелочном устройстве с принудительной регулируемой подачей струи перегретого водяного пара в зону горения. Проведены калори-



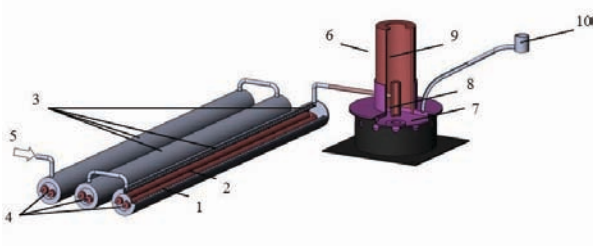


Рис. 1. Фотография горелочного устройства и схема экспериментальной установки: *1* — нагревательное устройство; *2* — теплоэлектрические нагреватели (ТЭН); *3* — место установки датчиков температуры; *4* — клеммы питания ТЭНов; *5* — подача воды; *6* — горелочное устройство; *7* — топочная камера; *8* — паровая форсунка; *9* — камера газогенерации; *10* — топливоприемник

метрические измерения тепловыделения и газовый анализ состава продуктов сгорания. Получены новые экспериментальные данные по теплотехническим и экологическим характеристикам исследуемого способа сжигания при различных режимных параметрах. Новые экспериментальные данные могут быть использованы при разработке и верификации физико-математических моделей изучаемого процесса.

Литература

1. **Характеристики** процесса сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов и др. // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 3. С. 37—44.
2. **Сажепаровый** режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 3. С. 411—414.
3. **Патент РФ** 2219435. Способ бессажного сжигания топлива / М.С. Вигриянов, В.В. Саломатов, С.В. Алексеенко; ИТ СО РАН; зарегистрирован 20.12.2003, приоритет от 11.02.2002.

I.S. Anufriev, S.S. Arsentyev, E.P. Kopyev, O.V. Sharypov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyeva ave., 1

INVESTIGATION OF LIQUID HYDROCARBONS COMBUSTION PROCESSES IN THE PRESENCE OF SUPERHEATED STEAM

УДК 621.9

*А.В. Аттетков, И.К. Волков, К.А. Гайдаенко**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

*e-mail: kseniya.gaydaenko@gmail.com

ИЕРАРХИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ СО СФЕРИЧЕСКИМ ОЧАГОМ РАЗОГРЕВА, ПОДВИЖНАЯ ГРАНИЦА КОТОРОГО ОБЛАДАЕТ ПЛЕНОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Рассмотрена задача об определении температурного поля в изотропном пространстве со сферическим очагом разогрева – шаровой полостью, заполненной высокотемпературным газом, граница которого движется по заданному закону и обладает изотропным покрытием постоянной толщины. Исследован нестационарный режим теплообмена с изменяющимися во времени коэффициентом теплоотдачи и температурой очага разогрева. Разработана базовая математическая модель процесса теплопереноса в изучаемой системе и иерархия ее упрощенных аналогов, базирующая на предположении о том, что покрытие подвижной границы очага разогрева является термически тонким покрытием пленочного типа. Разработанная иерархия упрощенных аналогов базовой модели включает «уточненную модель сосредоточенной емкости», модель «сосредоточенная емкость» и «усеченную модель сосредоточенной емкости». Каждая из математических моделей иерархии представляет собой смешанную задачу для уравнения в частных производных параболического типа со специфическим краевым условием, фактически учитывающим наличие пленочного покрытия на подвижной границе сферического очага разогрева. Определены условия, при удовлетворении которых упрощенные аналоги базовой модели позволяют с заданной точностью идентифицировать температурное поле изучаемой системы.

Литература

1. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
2. **Карташев Э.М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 2001. 550 с.
3. **Ладыженская О.А., Солонников В.А., Уральцева Н.Н.** Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа. М.: Наука, 1967. 736 с.
4. **Аттетков А.В., Волков И.К., Пилявский С.С.** Температурное поле твердого тела, содержащего сферический очаг разогрева с равномерно движущейся границей // Инженерно-физический журнал. 2009. Т. 82. № 2. С. 371—378.
5. **Пудовкин М.А., Волков И.К.** Краевые задачи математической теории теплопроводности в приложении к расчетам температурных полей в нефтяных пластах при заводнении. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1978. 188 с.

A.V. Attetkov, I.K. Volkov, K.A. Gaydaenko

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

HIERARCHY OF THE MATHEMATICAL MODELS OF THE HEAT TRANSFER PROCESS IN A SOLID WITH SPHERICAL HOT SPOT, WHICH MOVING BOUNDARY HAS A FILM COATING

УДК 62-97

А.А. Басов, М.А. Лексин, Ю.М. Прохоров

Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева,
141070, г. Королев, ул. Ленина, 4А

ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ ДВУХФАЗНОГО КОНТУРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Система обеспечения теплового режима космических аппаратов (СОТР КА) является одной из важнейших систем, от работы которой зависит нормальное функционирование КА. Основным способом терморегулирования, применяемым до настоящего времени на КА, является принудительный перенос теплоты с использованием замкнутых конвективных контуров с однофазным теплоносителем. При умеренных тепловых нагрузках до Q = 10 кВт такие замкнутые системы с включенными в них насосами, приводящими в движение теплоноситель, и радиаторами, отводящими избыточную теплоту излучением в космическое пространство, оказались достаточно надежными [1].

Отсутствие универсального теплоносителя, способного эффективно снимать тепло как при положительных, так и при отрицательных температурах, обуславливает использование двухконтурных СОТР. Теплоноситель внутреннего контура собирает тепло от оборудования и систем и через жидкостно-жидкостный теплообменник передает его теплоносителю наружного контура (НГК), который сбрасывается в окружающее пространство посредством радиационного теплообменника.

Перспективным вариантом является разработка НГК на основе двухфазных контуров теплопереноса (ДФК), использующих двухфазный кипящий теплоноситель [2]. В таких теплоносителях теплота аккумулируется в виде скрытой теплоты парообразования, что позволяет переносить значительно большее количество теплоты на единицу массового расхода теплоносителя, чем в случае применения однофазных теплоносителей.

Потребный расход двухфазного теплоносителя намного меньше расхода теплоносителя в однофазной системе, что ведет к уменьшению габаритов и массы трубопроводов и арматуры, мощности насоса. Использование теплообмена при фазовых превращениях позволяет снизить массу теплообменных агрегатов, а также поддерживать температуру термостатируемых элементов на всей протяженности контура близкой к температуре кипения теплоносителя.

Разрабатываемая СОТР с НГК на основе ДФК предполагает работу как в однофазном, так и в двухфазном режимах.

Радиационный теплообменник, предназначенный для сброса тепла в окружающее пространство, состоит из радиационной поверхности, на которой

с определенным шагом установлены с обеспечением гарантированного теплового контакта теплопередающие элементы (ТПЭ) на основе тепловых труб (ТТ).

ТПЭ состоит из тепловой трубы и теплообменника-конденсатора (ТК), установленного на конце тепловой трубы с обеспечением гарантированного теплового контакта. ТК состоит из двух полостей: одна из полостей ТК предназначена для охлаждения жидкого теплоносителя, другая — для конденсации его паров. Паровая и жидкостная полости ТК соединены капиллярным затвором, предназначенным для удаления сконденсировавшегося теплоносителя в жидкостную полость и предотвращения попадания пара в жидкостную полость ТК. В составе РТО входные и выходные штуцеры паровой и жидкостной полостей ТК соединены последовательно, образуя жидкостные и паровые кольцевые коллекторы РТО.

С помощью программного комплекса ANSYS были получены поля температур, давлений и скоростей при течении жидкого и парообразного теплоносителей НГК через паровую и жидкостную полости ТПЭ, на основании которых было подтверждено, что тепловые и гидравлические характеристики ТПЭ удовлетворяют заданным.

Результаты расчета хорошо согласуются с результатами проведенных лабораторно-отработочных испытаний.

Литература

1. **Малоземов В.В., Рожнов В.Ф., Правецкий В.Н.** Системы обеспечения экипажей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 584 с.
2. **Никонов А.А., Горбенко Г.А., Блинков В.Н.**Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов. М.: Центр НТИ Поиск. Сер.: Ракетно-космическая техника, 1991. 302 с.

A.A. Basov, M.A. Leksin, Y.M Prohorov

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia
Russia, 141070, Korolev, Lenina str., 4A

HEAT-EXCHANGE ELEMENT OF RADIATOR FOR SPACECRAFT TWO-PHASE CIRCLE

УДК 536.468

К.Ю. Вершинина, П.А. Стрижак*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30

*e-mail: vershininaks@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ЖИДКОГО ГОРЮЧЕГО КОМПОНЕНТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ СУСПЕНЗИЙ

В настоящей работе экспериментально исследовано влияние жидких горючих компонентов на характеристики зажигания капель трехкомпонентных (вода, уголь или отход углеобогащения, жидкий нефтепродукт) органоводоугольных топлив (ОВУТ) [1, 2].

Основными компонентами исследуемых топлив являлись: отходы обогащения углей разных марок (фильтр-кеки); отработанные масла (моторное, турбинное, трансформаторное, компрессорное, касторовое и др.); вода. Начальный размер капель топлива варьировался в диапазоне 0,5—1,5 мм; температура и скорость движения потока окислителя изменялись в диапазонах 600—1000 К и 0,5—3 м/с. Используемая экспериментальная методика основана на помещении одиночной капли ОВУТ, закрепленной на спае термоэлектрического преобразователя, в поток разогретого окислителя. Методики экспериментального исследования, регистрации и вычисления характеристик зажигания аналогичны используемым в [2].

Следует отметить, что добавление относительно небольшого количества (5—15 % масс.) отработанного масла или другого жидкого нефтепродукта в водоугольную суспензию приводит к заметному увеличению теплоты сгорания топливной композиции за счет высокой теплоты сгорания (35—46 МДж/кг) компонентов нефтяного происхождения.

Установлено снижение пороговых температур и времени задержки зажигания ОВУТ на основе фильтр-кеков каменных углей при увеличении доли жидкого нефтепродукта. Так, например, с увеличением массовой доли отработанного турбинного масла до 15 % в составе ОВУТ на основе фильтр-кека коксующегося угля времена задержки зажигания для капель размерами 0,5—1,5 мм снижаются на 20—40 % (рис. 1). Однако данный эффект наиболее выражен для ОВУТ на основе углей или фильтр-кеков с небольшим содержанием летучих веществ. Для суспензий на основе высокореакционных углей (бурых) с высоким содержанием летучих добавление жидких горючих компонентов приводит к росту как инерционности, так и пороговых температур зажигания. Такие особенности обусловлены изменением длительности стадий прогрева влагосодержащей части топлива, испарения жидких компонентов, формирования смеси паров воды, горючей жид-

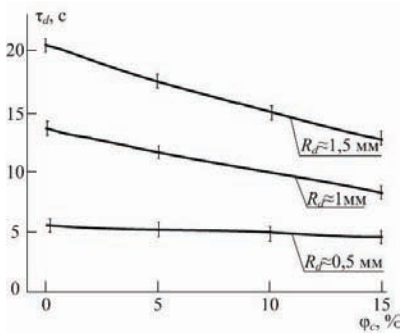


Рис. 1. Время задержки зажигания капель ОВУТ на основе фильтр-кека марки К в зависимости от концентрации отработанного турбинного масла

кости и продуктов термического разложения твердого горючего компонента. Использование в суспензии жидкого горючего нефтепродукта с высокими значениями температур вспышки и зажигания, теплоты парообразования (например, мазута) приводит к увеличению длительностей процессов прогрева, испарения и зажигания паров жидкого горючего компонента, прогрева углеродного остатка и его гетерогенного зажигания.

Следует также отметить, что добавка жидкого горючего компонента в диапазоне массовых концентраций 5–15 % улучшала сегментарную устойчивость суспензии (топливо расслаивалось незначительно в течение 15 суток хранения).

Таким образом, в результате проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что использование отработанных масел в водоугольных суспензиях способствует, с одной стороны, утилизации нефтепродуктов, с другой — получению топливной суспензии с новыми энергетическими и реологическими свойствами.

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда (проект № 15–19–10003).

Литература

1. **Овчинников Ю.В., Цепенок А.И., Шихотинов А.В., Татарникова Е.В.** Исследование воспламенения твердых топлив и ИКЖТ // Доклады Академии наук высшей школы РФ. 2011. С. 117—126.
2. **Вершинина К.Ю., Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.** Отличия характеристик зажигания водоугольных суспензий и композиционного жидкого топлива // Химия твердого топлива. 2016. № 2. С. 21—33.

K.Yu. Vershinina, P.A. Strizhak

National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050 Tomsk, Lenina ave., 30

INFLUENCE OF COMBUSTIBLE LIQUIDS ON IGNITION OF COAL-WATER SLURRIES

УДК 62-62

*А.В. Веткин**

Московский политехнический университет,
107023, Москва, ул. Большая Семёновская, 38
Научный консультант: чл.-корр. РАН, д.т.н. Покусаев Борис Григорьевич

*e-mail: avetkin@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕВАЛА В ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ ПРИ ГОРЕНИИ ГАЗООБРАЗНЫХ ТОПЛИВ

В настоящей работе проведены численные и экспериментальные исследования влияния состава газообразного топлива на теплотехнические и экологические характеристики трубчатой печи. Исследования проводились на трубчатой печи нагрева теплоносителя — масла АМТ-300. В качестве топлива принимались природный газ, в большинстве своем состоящий из метана, и топливный газ, компонентный состав которого включал бутан.

В последнее время замечено, что по причине снижения экономических затрат целый ряд нефтеперерабатывающих заводов перешел на потребление топливного газа собственной выработки. Для сжигания используется отходящий горючий газ от различных установок. Таким образом, возникает вопрос переориентирования производства и технологического цикла, а также установок, потребляющих для сжигания газ одного компонентного состава на газ другого компонентного состава. Первоначально печь была спроектирована на режим эксплуатации и сжигания природного газа, однако экономические затраты продиктовали необходимость применения в качестве топлива газа собственной выработки.

С научной точки зрения данное явление представляет интерес по оценке изменения характеристики теплопереноса в трубчатых печах, спроектированных для работы на природном газе, при переходе на газообразное топливо другого состава. Важным фактором является и изменение длины факела, что может привести к нарушению полноты сгорания ввиду возможного касания факелом поверхностей нагрева [1].

Здесь следует отметить, что основным назначением трубчатой печи является подвод тепла нагреваемому сырью или обеспечение необходимого температурного режима для проведения химической реакции в исходном нагреваемом сырье. На данный момент основным источником образования тепла в печи является тепло, образующееся в результате горения топлива. Сам процесс горения происходит с помощью промышленных горелочных устройств, установленных в камере сгорания печи. Большая часть тепла передается в камере сгорания трубчатых печей. Дымовые газы в камере радиации передают тепло излучением, в камере конвекции большая часть тепла передается за счет движения горячих дымовых газов между оребренными, поперечно-расположенными сырьевыми трубами [2]. Одновременно

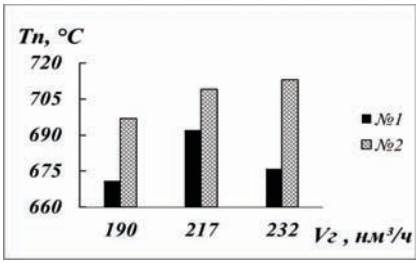


Рис. 1. Изменение температуры перевала для газов различного состава состава: $T_п$ — температура перевала, °С; $V_г$ — расход топлива, нм^3/ч

становится важным вопрос влияния горения топливных газов на выбросы оксидов азота для работающей трубчатой печи.

Определяющим фактором эффективности теплопередачи в камере сгорания трубчатой печи является температура газов на перевале. На рис. 1 показано изменение температуры перевала в трубчатой печи для природного газа (состав № 1) и топливного газа (состав № 2).

В результате анализа полученных диаграмм установлено, что в зависимости от содержания более тяжелых углеводородов в составе сжигаемого топливного газа в камерах сгорания увеличиваются лучистая и конвективная составляющие теплопередачи.

Получено хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных по распределению температуры продуктов сгорания в трубчатой печи. Расчетное исследование показало незначительно завышенные значения температур. Это объясняется тем, что при расчетах температуры образования факела мы не учитывали диссоциацию продуктов горения.

Принятая методика расчета теплопередачи в трубчатой печи основана на общеизвестных способах расчета теплопередачи при сгорании газообразного топлива. Численный расчет сложного теплообмена, основан на теории теплообмена Ц.А. Бахшияна и Н.И. Белоконя.

Литература

1. **Лебедева Е.А., Гордеев Б.А., Зимняков П.С.** Численное исследование фронта пламени топливных смесей с использованием отбросных газов нефтехимического комплекса // Приволжский научный журнал. 2015. № 4 (36). С. 75—81.
2. **Seong-Yeon Yoo., Hwa-Kil Kwon., Jin-Hyuk Kim.** A study on heat transfer characteristics for staggered tube banks in cross-flow // Journal of mechanical science and technology. KSME International Journal. Korea. 2006. No 3. P. 505—512.

A.V. Vetkin, B.G. Pokusaev

Moscow Polytechnic University,
Russia, 107023, Moscow, Bol'shaya Semenovskaya str., 38

INVESTIGATION OF BRIDGEWALL TEMPERATURE BY HEATER OF COMBUSTION OF GASEOUS FUELS

УДК 536.468

Д.О. Глушков, П.А. Стрижак*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30

*e-mail: dmitriyog@tpu.ru

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ЗАЖИГАНИИ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА НАГРЕТОЙ ДО ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ЧАСТИЦЕЙ

В настоящее время полимерные материалы (ПМ) достаточно широко распространены в промышленности и на объектах социальной сферы. С одной стороны, такие вещества характеризуются относительно высокой пожарной опасностью, с другой стороны, являются перспективными для применения в качестве энергетических материалов в специальных установках.

Экспериментальное исследование процессов зажигания конденсированных веществ представляет достаточно сложную задачу. Метрологическое обеспечение на высоком уровне экспериментов по изучению взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих в конденсированной фазе и газовой среде, во многих случаях нереализуемо на практике, например вследствие относительно малых значений времен зажигания.

Теоретическое исследование и прогнозирование характеристик таких процессов в рамках математических моделей, описывающих взаимодействие нагретой до высоких температур частицы с ПМ, является актуальной задачей, решение которой создает основу для разработки мероприятий по предупреждению и предотвращению нерегламентированных возгораний широко распространенных полимерных материалов, а также для развития перспективной технологии энергоэффективного инициирования горения полимеров при локальном нагреве источниками ограниченной энергоемкости.

Целью настоящего исследования является разработка математической модели процесса зажигания типичного термопластичного полимера – полиметилметакрилата горячей частицей, анализ влияния группы значимых факторов на характеристики и условия инициирования горения.

Принята наиболее общая схема процесса. Предполагалось, что нагретая до высоких температур частица инерционно осаждается на поверхность ПМ (рис. 1). Разработанная математическая модель описывает прогрев приповерхностного слоя полимера в результате кондуктивной тепло-

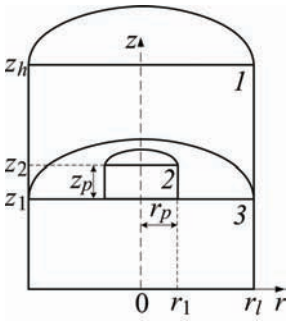


Рис. 1. Схема области решения задачи зажигания: *1* — воздух; *2* — горячая частица; *3* — полимер

передачи от локального источника, термическое разложение ПМ, выход газообразных продуктов деструкции в среду окислителя, диффузионно-конвективный тепломассоперенос в газовой среде, формирование горючей газовой смеси, дополнительный ее прогрев в результате движения вдоль боковых граней частицы и инициирование горения в газовой среде.

Математическая модель [1, 2] представлена системой нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, соответствующих основным положениям общей теории теплопереноса в химической кинетике и свободной конвекции.

В результате выполненного исследования установлена устойчивость переходного процесса. Выявлены три режима зажигания полимера, характеризующиеся начальной температурой локального источника нагрева, длительностью индукционного периода и расположением зоны зажигания в окрестности разогретой частицы. Установлено влияние на основную характеристику процесса – время задержки зажигания значимых факторов: начальной температуры, размеров, формы, теплофизических свойств и количества источников ограниченной энергоемкости, их частичного или полного внедрения в приповерхностный слой вещества, изменения теплофизических свойств веществ и материалов при нагревании, выгорания прогретой области приповерхностного слоя полимера, диффузионно-конвективного тепломассопереноса в среде окислителя.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-6491.2016.8).

Литература

1. **Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.** Зажигание полимерного материала одиночными горячими металлическими и неметаллическими частицами при диффузионно-конвективном тепломассопереносе в среде окислителя // ХФ. 2014. Т. 33. № 9. С. 26—33.
2. **Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.** Численное исследование влияния выгорания на характеристики зажигания полимера при локальном нагреве // ФГВ. 2017. Т. 53. № 2. С. 1—12.

D.O. Glushkov, P.A. Strizhak

National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin ave., 30

HEAT AND MASS TRANSFER AT THE IGNITION OF A POLYMER BY A HOT PARTICLE

УДК 621.9

А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30

*e-mail: zhdanovaao@tpu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ЭФФЕКТИВНОГО ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПЛЕНКОЙ И МАЛОЙ ГРУППОЙ КАПЕЛЬ

Лесные пожары каждый год уничтожают миллионы гектаров лесов [1]. Как правило, ликвидация и локализация пожара осуществляется при помощи авиации [2]. Выполненные в последние годы теоретические [3] исследования показали, что при локальном сбросе больших водяных массивов в очаг пожара около 90—95 % жидкости неэффективно задействовано в процессе тушения.

Цель настоящей работы — экспериментальное определение достаточных условий тушения модельных очагов горения, состоящих из смеси типичных лесных горючих материалов (ЛГМ), при воздействии группы капель, пленки воды, а также аэрозольного потока.

Схема использованного экспериментального стенда и методика проведения аналогичны [4]. Стенд был дополнительно оснащен электронным одноканальным дозатором Finnpipette Novus для генерации последовательных капель. Для создания пленки использовалась та же система распыления [4]. Однако подача водяного тумана в модельный очаг осуществлялась до момента образования на поверхности ЛГМ тонкой пленки воды.

На рис. 1 приведены зависимости времен подавления горения t_e от толщины навески ЛГМ для очага диаметром $d_f \approx 60$ мм. Рис. 2 иллюстрирует зависимость объема V_e, израсходованного при тушении модельного очага, от толщины h_f и диаметра d_f для трех различных механизмов (способов) ликвидации возгорания. Выполненные эксперименты показали, что в зависимости от приоритета (минимальные значения V_e, или t_e) при тушении ЛГМ можно использовать капельные потоки, водяной туман и даже тонкие пленки жидкости. Водяной туман (аэрозольный поток с размерами капель менее 100 мкм) характеризуется минимальными временами тушения. При последовательной подаче одиночных довольно крупных (диаметры около 3 мм) капель также можно подавить модельные очаги горения ЛГМ, но с максимальной для проведенных экспериментов длительностью. При увеличении площади очага горения до размеров в 10 и более раз превышающей площадь поверхности генерируемых капель тушение невозможно.

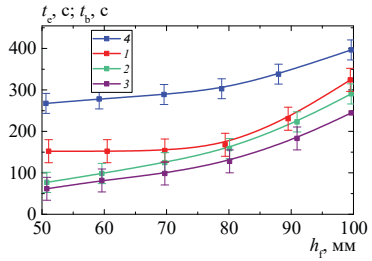


Рис. 1. Длительности исследуемых процессов при варьировании высоты очага горения ЛГМ диаметром $d_f \approx 60$ мм: *1* — при тушении одиночными каплями (размеры капель $R_d \approx 1{,}5$ мм); *2* — при тушении пленкой воды; *3* — при тушении водяным туманом (размеры капель $R_d = 0{,}01 \div 0{,}1$ мм); *4* — времена выгорания ЛГМ (без тушения)

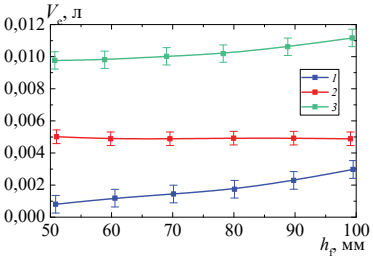


Рис. 2. Объем воды V_e, израсходованный на тушение очага горения ЛГМ, при варьировании высоты h_f с $d_f \approx 60$ мм: *1* — при тушении одиночными каплями (размеры капель $R_d \approx 1{,}5$ мм); *2* — при тушении пленкой воды; *3* — при тушении водяным туманом (размеры капель $R_d = 0{,}01 \div 0{,}1$ мм)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-39-00003).

Литература

1. **Атлас** риска пожаров на территории Российской Федерации. М.: Издательско-продюсерский центр «Дизайн. Информация. Картография», 2010. 640 с.
2. **Копылов Н.П.** Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров // ПБ. 2015. № 2. С. 49—55.
3. **Zhdanova A.O.** Numerical investigation of physicochemical processes occurring during water evaporation in the surface layer pores of a forest combustible material // J. Eng. Phys. Thermophys. 2014. Vol. 87(4). P. 773—781.
4. **Zhdanova A.O.** Determination of the minimal amount of water for effective suppression of the thermal decomposition of forest combustible materials // Matec. Web. Conf. 2016. Vol. 72. 01134.

A.O. Zhdanova, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak

National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050 Tomsk, Lenin ave., 30

DETERMINING CONDITIONS OF EXTINGUISHING OF FOREST COMBUSTIBLE MATERIALS BY FILM AND SMALL DROPLETS GROUP

УДК 536.7:544.341.2:519.6:661.487

А.Р. Зимин, Д.С. Пашкевич*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: ars.zimin@mail.ru

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Гексафторид урана (ГФУ) UF_6 используют при изотопном обогащении урана в ядерном топливном цикле [1]. В этом процессе в качестве побочного продукта образуется гексафторид урана, обедненного по изотопу ^{235}U (ОГФУ). Гексафторид урана (ГФУ) является веществом первого класса опасности, ПДК составляет 0,015 мг·м$^{-3}$, летучим (P = 0,1 МПа при T = = 329 К), поэтому его накопление и хранение представляет собой экологическую угрозу.

Существующие методы переработки ОГФУ не позволяют получить из него безводный фтористый водород и замкнуть ядерный топливный цикл по фтору. Одним из разрабатываемых в настоящее время в России способов конверсии ОГФУ является его взаимодействие с водородсодержащими и кислородсодержащими веществами в режиме горения, продуктами которого должны являться диоксид урана и фтористый водород, например:

$$UF_{6\ газ} + 3H_{2\ газ} + O_{2\ газ} \rightarrow UO_{2\ тв} + 6HF_{газ} + 583\ кДж. \quad (1)$$

При этом известно [1], что уран образует целый ряд фторидов, оксидов и оксифторидов, из которых наиболее термодинамически устойчивыми наряду с диоксидом урана являются тетрафторид урана и уранилфторид, т.е. в составе продуктов процесса (1) могут присутствовать эти вещества, например:

$$UF_{6\ газ} + 3H_{2\ газ} + O_{2\ газ} \rightarrow UF_{4\ тв} + 2HF_{газ} + 2H_2O_{газ} + 827\ кДж, \quad (2)$$

$$UF_{6\ газ} + 3H_{2\ газ} + O_{2\ газ} \rightarrow UO_2F_{2\ тв} + 4HF_{газ} + H_{2газ} + 614\ кДж. \quad (3)$$

Для оценки интервала температуры, в котором основным урансодержащим веществом является диоксид урана, а основным фторсодержащим веществом — фторид водорода, авторы рассчитали зависимость изменения энергии Гиббса при атмосферном давлении для процессов (1—3), а также для иных водородсодержащих веществ и воздуха, в том числе:

$$UF_{6\ газ} + 2NH_{3\ газ} + O_{2\ газ} \rightarrow UO_{2\ тв} + 6HF_{газ} + N_{2\ газ} + 490\ кДж, \quad (4)$$

$$UF_{6\ газ} + 2NH_{3\ газ} + O_{2\ газ} \rightarrow UO_2F_{2\ тв} + 4HF_{газ} + H_{2\ газ} + N_{2\ газ} + 522\ кДж, \quad (5)$$

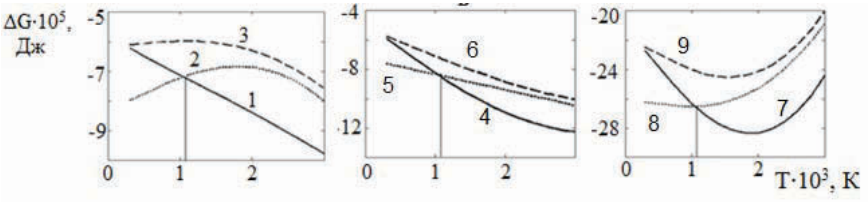
$$UF_{6газ} + 2NH_{3газ} + O_{2\ газ} \rightarrow UF_{4тв} + 2HF_{газ} + 2H_2O_{газ} + N_{2газ} + 429\ кДж\ , \quad (6)$$

$$2UF_{6\ газ} + 3CH_{4газ} + 5O_{2газ} \rightarrow 2UO_{2\ тв} + 12HF_{газ} + 3CO_{2газ} + 2121\ кДж, \quad (7)$$

$$2UF_{6\,газ}+3CH_{4газ}+5O_{2газ}\rightarrow 2UF_{4тв}+4HF_{газ}+3CO_{2газ}+4H_2O_{газ}+930\ кДж\ , \quad (8)$$

$$2UF_{6\,газ}+3CH_{4газ}+5O_{2газ}\rightarrow 2UO_2F_{2тв}+8HF_{газ}+3CO_{2газ}+2H_{2газ}+933\ кДж\ . \quad (9)$$

Результаты расчета приведены на рис. 1. Данные о коэффициентах полинома теплоемкости, стандартных энтальпии и энтропии выбирали с использованием [2].



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Зависимости изменения энергии Гиббса от температуры для процессов (1—9): *а* — процессы 1, 2, 3; *б* — процессы 4, 5, 6; *в* — процессы 7, 8, 9

Из приведенных зависимостей следует, что для всех процессов (1—9) изменение энергии Гиббса отрицательно, таким образом реакции (1—9) являются необратимыми. При температуре выше 1050 К максимальное по модулю значение изменения энергии Гиббса наблюдается для процессов (1, 4, 7). Таким образом, при температуре выше 1050 К основными веществами в термодинамически равновесной смеси будут диоксид урана и фторид водорода.

Расчетами показано, что в связи с высокими тепловыми эффектами процессов (1—9), указанная температура может быть достигнута в них за счет тепловыделения реакций в нестационарном тепловом режиме (режиме горения), в том числе с учетом теплового излучения запыленного потока.

Таким образом, рассмотренный метод может стать основой промышленной технологии переработки ОГФУ с получением диоксида урана и фторида водорода.

Литература

1. **Тураев Н.С., Жерин И.И.** Химия и технология урана. Л.: Цниатоминформ, 2005. 409 с.
2. **Термодинамические** свойства индивидуальных веществ: Справочное издание (3-е изд.) / под ред. В.П. Глушко. Т. 4. Кн. 1. М.: Наука, 1979.

A.R. Zimin, D.S. Pashkevich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

THERMODYNAMIC FUNDAMENTALS OF URANIUM HEXAFLUORIDE RECOVERY IN THE COMBUSTION MODE

УДК 536.7: 544.341.2:519.6: 661.487.1

В.В. Капустин[1]*, *Д.С. Пашкевич*[1], *Ю.И. Алексеев*[2], *В.Б. Петров*[2], *Д.А. Мухортов*[2], *П.С. Камбур*[2], *М.П. Камбур*[2], *В.А. Талалов*[1]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

[2] ФГУП РНЦ «Прикладная химия», 193232, Санкт-Петербург, ул. Крыленко, 26А

*e-mail: Valentin.Kapustin.2014@yandex.ru

ПОЛУЧЕНИЕ БЕЗВОДНОГО ФТОРИДА ВОДОРОДА ИЗ ПЛАВИКОВОЙ КИСЛОТЫ НА ОСНОВЕ РЕАКЦИИ ВОДЯНОГО ГАЗА В РЕЖИМЕ ГЕТЕРОГЕННОГО ГОРЕНИЯ

Безводный фторид водорода (БФВ) HF находит широкое применение в современной промышленности [1]. Его используют при производстве ядерного топлива, фтормономеров, озонобезопасных хладонов, электронных газов и др. Единственным промышленным методом получения БФВ является сернокислотное разложение природного минерала флюорита CaF_2, стоимость которого за последние три года увеличилась в два раза. Таким образом, разработка альтернативных методов получения БФВ является весьма актуальной задачей.

В ряде отраслей промышленности образуется водный раствор фторида водорода, который при содержании HF 35—40 % является азеотропным, и получить из него БФВ ректификацией невозможно. Например, при переработке гексафторида урана, обедненного по изотопу 235, получают 40%-ный азеотропный раствор фторида водорода, который не может быть использован в ядерном топливном цикле [2].

В настоящее время не известны промышленные способы получения БФВ из его азеотропного водного раствора.

Переработку водных растворов фторида водорода, в том числе и азеотропного, с целью получения БФВ можно осуществлять с использованием реакции водяного газа, которая протекает при температуре выше 1000 К [3]:

$$C_{тв} + H_2O_{газ} \rightarrow CO_{газ} + H_{2\ газ} + 132\ кДж. \qquad (1)$$

Основными вопросами, которые возникают при разработке научных основ предлагаемого метода, являются химическая стабильность фторида водорода в условиях проведения реакции водяного газа и возможность образования в этих условиях фторидов и оксифторидов углерода, в первую очередь тетрафторида углерода CF_4 и оксида-дифторида углерода COF_2, т.е. возможность проведения процесса по схеме, когда вода восстанавливается углеродом, а фторид водорода остается инертным:

$$C_{тв} + HF_{газ} + H_2O_{газ} \rightarrow CO_{газ} + H_{2\ газ} + HF_{газ}. \quad (2)$$

Расчетами было показано, что в системе элементов C—H—O—F при температуре выше 1200 К термодинамически равновесная смесь состоит из фторида водорода, монооксида углерода и водорода, а фториды и оксифториды углерода в ней отсутствуют.

Для экспериментального исследования предложенного метода была создана лабораторная установка, в которой предварительно испаренную смесь фторида водорода и воды подавали в стационарный слой углерода, нагретый до 1000—2000 К. Температуру в слое поддерживали, подавая в зону реакции кислород. Инициирование высокотемпературной зоны осуществляли с помощью газофазного факела горения пропан-бутановой смеси в кислороде или съемного кварцевого электронагревателя.

В результате анализа продуктов этого процесса было показано, что фторид водорода остается стабильным в зоне реакции, тетрафторид углерода и оксид-дифторид углерода практически не образуются, вода восстанавливается углеродом с образованием водорода и монооксида углерода.

Таким образом, предложенный метод может стать основой промышленной технологии получения БФВ из его водных растворов, в том числе азеотропных.

Литература

1. **Промышленные** фторорганические продукты: Справочное издание /Б.Н. Максимов, В.Г. Барабанов, И.Л. Серушкин и др. Л.: Химия, 1990. 464 с.: ил.
2. **Местели Д.** Способ восстановления безводного фтористого водорода из обедненного гексафторида урана. Патент РФ № 2126362. Приоритет 21.01.1993.
3. **Канторович Б.В.** Основы горения и газификации твердого топлива. М.: Издательство АН СССР, 1958. 600 с.

V.V. Kapustin[1], *D.S. Pashkevich*[1], *Y.I. Alexeev*[2], *V.B. Petrov*[2], *D.A. Mykhortov*[2], *P.S. Kambur*[2], *M.P. Kambu*[2], *V.A. Talalov*[1]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29
[2]Russian Scientific Center Applied Chemistry,
Russia, 193232, St. Petersburg, Krylenko str., 26A

RETRIEVAL OF ANHYDROUS HYDROGEN FLUORIDE FROM HYDROFLUORIC ACID BASED ON THE REACTION OF WATER GAS IN THE MODE OF HETEROGENEOUS COMBUSTION

УДК 536.242:544.452.2

А.И. Карпов, А.А. Шаклеин, А.А. Болкисев*

Институт механики УрО РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

*e-mail: mx.oryx@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛАМЕНИ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА

В работе проводится численное моделирование сопряженного тепломассопереноса при распространении диффузионного пламени по вертикальной поверхности твердого горючего материала. Математическая модель обладает следующими особенностями [1]. Турбулентное течение с переменной плотностью описывается вихреразрешающей моделью DDES, основанной на уравнениях k-ω SST. Механизм процесса окисления газифицированного горючего описывается одной макрореакцией. В работе используется модифицированная модель турбулентного горения EBU с учетом кинетических эффектов, кинетическая скорость протекания реакции горения описывается в виде зависимости Аррениуса. Теплоперенос излучением моделируется моделью P1. Исследуемый материал (полиметилметакрилат – ПММА) оптически почти непрозрачен в тепловом диапазоне излучения, что позволяет принять допущение о полном поглощении излучения на его поверхности. Излучение считается изотропным, рассеянием пренебрегается. Коэффициент поглощения смеси определяется на основе свойств каждого компонента. Газовая среда считается серой, коэффициент поглощения осредняется по всему спектру и рассчитывается в зависимости от температуры в виде полинома пятой степени. Скорость термического разложения твердого горючего материала определяется в виде зависимости Аррениуса. Скорость газификации на поверхности твердого материала рассчитывается по линейному интегралу от объемной скорости пиролиза.

Исследуются теплофизические процессы при распространении пламени по вертикальной поверхности ПММА высотой 5 м и толщиной 6 мм.

Молекулярный (кривая *2*, рис. 1) и суммарный (кривая *1*) тепловые потоки имеют немонотонный профиль из-за пульсаций температур вблизи поверхности. В начальные моменты времени (рис. 1, *а*, *б*) радиационный тепловой поток (кривая *3*) имеет гладкий профиль, так как в каждую точку поверхности энергия, передающаяся излучением, поступает со всей области горения, сглаживая неровности поля температур. По мере распространения пламени температура поверхности повышается, увеличивая долю в общем радиационном тепловом потоке энергии, излучаемой самой поверхностью.

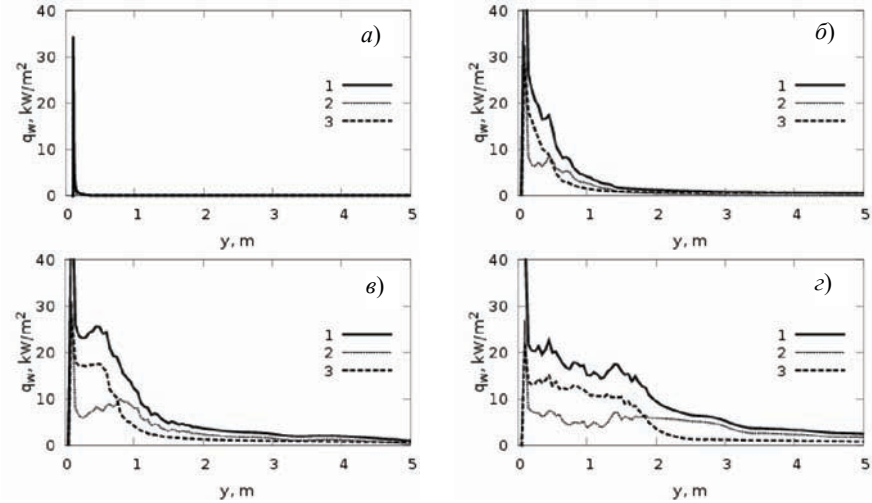


Рис. 1. Распределение тепловых потоков (*1* – суммарный, *2* – диффузионный, *3* – радиационный), в различные моменты времени: *а* – 0 с; *б* – 120 с; *в* – 160 с; *г* – 200 с

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-38-00543 мол_а и № 16-08-00110 а).

Литература

1. **Шаклеин А.А., Карпов А.И., Корепанов М.А.** Моделирование распространения турбулентного пламени по вертикальной поверхности горючего материала // Химическая физика и мезоскопия. 2014. Т. 16. № 3. С. 331—339.

A.I. Karpov, A.A. Shaklein, A.A. Bolkisev

Institute of mechanics of UB RAS,
Russia, 426067, Izhevsk, T. Baramzinoy str., 34

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT AND MASS TRANSFER OF UPWARD FLAME SPREAD

УДК 662.612

Е.С. Коковина, Е.А. Кузнецов, А.Ю. Снегирёв

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

РЕЖИМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Современное состояние методов численного моделирования пожаров, несмотря на их интенсивное развитие, не позволяет решить задачу прогнозирования распространения пламени по поверхности горючего материала для широкого диапазона сценариев. Количество публикаций по данной теме, ограничено [1—3], при этом хорошее согласование с экспериментальными данными встречается достаточно редко.

В данной работе FDS, один из наиболее популярных инструментов для моделирования пожара, применяется для численного исследования распространения пламени снизу вверх по вертикальным и наклонным поверхностям с учетом тепловой обратной связи между пиролизом твердого материала и горением в газовой фазе. В качестве исследуемого материла выбран ПММА (полностью газифицирующийся термопластик). Рассмотрены крупномасштабный (высота пластины 5 м, [4]) и лабораторный эксперименты (высота пластины 20 см, [5]).

Расчет турбулентности в данной работе проводился по методу LES. Учет спектральных свойств продуктов сгорания проводился с использованием приближения серого газа. На длину теплового факела приходилось не менее 10 ячеек расчетной сетки ($D^*/\delta x > 10$) для газовой фазы, что соответствует рекомендациям, принятым в инженерной практике при моделировании естественно-конвективного пламени в открытом пространстве. Число ячеек составляло от 400 тыс. до 1,5 млн.

Установлено, что модель и код FDS способны воспроизвести основные качественные и количественные характеристики процесса распространения пламени. На рис. 1 показано сравнение расчетной высоты зоны пиролиза с экспериментальными данными. Высота зоны пиролиза соответствовала высоте, на которой скорость выгорания достигала критического значения [0,004 кг/(м^2·с)]. Результаты расчета оказываются чувствительны к мощности и размерам теплового излучателя, служащего источником зажигания. Имеют место два качественно разных режима распространения фронта пламени по поверхности пластины горючего материала. В осевом режиме имеет место проскок пламени вдоль оси пластины. Во фронтальном режиме выгорание материала происходит по всей ширине пластины.

Расчет удовлетворительно воспроизводит динамику распространения пламени только в тех случаях, когда лучистый тепловой поток доминирует

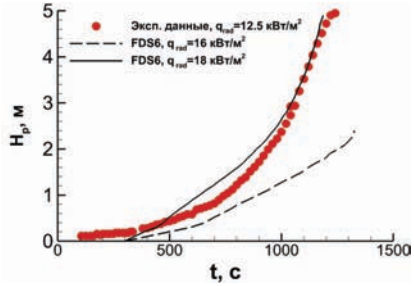


Рис. 1. Зависимость высоты зоны пиролиза от времени, сравнение с экспериментальными данными [4]

в тепловом балансе на поверхности пластины. FDS не удается воспроизвести самоподдерживающееся горение, что указывает на недостаточную точность расчета конвективного теплового потока из пламени к поверхности горючего материала. К недостаткам модели можно также отнести одномерную модель теплопроводности, по которой передача тепла вглубь материала осуществляется только по нормали к его поверхности. Повысить точность расчета можно за счет значительного измельчения расчетной сетки в приповерхностной области или уточнения пристеночных функций, используемых FDS.

Работа выполнена с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический» и при частичной поддержке гранта РНФ 16-49-02017.

Литература

1. **Schjerve N.** Flame Spread in the Initial Phase of a Fire Experiments, Calculations and Simulations // Proc. of the Thirteenth International Interflam Conference. 2013. 497—502.
2. **Marquis D.M., Pavageau M., Guillaume E.** Multi-scale simulations of fire growth on a sandwich composite structure // Journal of Fire Science.2012. 31. 3—34.
3. **Snegirev A., Kokovina E., Tsoy A.** Coupled simulations of turbulent flame and pyrolysis of combustible material // Proceedings of the European Combustion Meeting – 2015, Paper P4-16. 30 March – 2 April. 2015. Budapest, Hungary.
4. **Wu P.K., Orloff L.** Tewarson A. Assessment of Material Flammability with the FSG Propagation Model and Laboratory Test Methods // 13th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, NIST. Gaithersburg, MD, USA, 1996.
5. **Experimental** study of upward flame spread of an inclined fuel surface / M.J. Gollner, X. Huang, J. Cobian et al. // Proc. Combust. Inst. 2013. 34. 2531—2538.

E.S. Kokovina, E.A. Kuznetsov, A.Yu. Snegirev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

REGIMES OF FLAME SPREAD OVER COMBUSTIBLE MATERIALS

УДК 621.45.022.2

В.В. Кононова, А.И. Гурьянов

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СМЕШАННОГО И СИНТЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В ПРОТИВОТОЧНОМ ГОРЕЛОЧНОМ МОДУЛЕ

Общими проблемами создания горелочных устройств и камер сгорания являются: обеспечение высокой полноты сгорания топлива (не менее 99,99 %); сокращение выбросов загрязняющих атмосферу веществ при минимальных размерах зоны горения; снижение вероятности срыва пламени и расширение концентрационного диапазона устойчивого горения [1]. Ужесточение норм ИКАО на эмиссию NO_x и CO газотурбинными двигателями, энергоустановками крупной и малой энергетики определяют актуальность изучения альтернативных принципов и аэродинамических схем организации горения и, соответственно, конструкций устройств сжигания топлива, реализующих эти принципы.

В России, как и в зарубежных странах, имеется успешный опыт создания камер сгорания, у которых горелочный модуль работает на альтернативных видах топлива, в том числе на синтез-газе. Применение таких устройств в газотурбинных установках является одним из наиболее целесообразных решений вышеупомянутых проблем. Однако на настоящий момент отсутствуют как эффективные конструкции таких устройств, так и адекватные проверенные экспериментально методики их расчета и проектирования. Это определяет актуальность работ, посвященных вопросам проектирования камер сгорания, работающих на синтез-газе [2].

Проведены исследования особенностей процессов горения топливных смесей, содержащих продукты каталитической конверсии метана (синтез-газ) в условиях газодинамического противотока.

Результаты экспериментов по горению смешанного топлива (синтез-газ и метан) показали, что добавка синтез-газа в диапазоне от 7 до 80 % сопровождается скачкообразным расширением концентрационного диапазона устойчивого горения более чем в 4 раза в количественном выражении по сравнению с метаном. В ходе экспериментов было установлено, что перевод устройств сжигания топлива на синтетический газ сопровождается двукратным снижением эмиссии оксидов азота во всем концентрационном диапазоне устойчивого горения, относительно горения метана. Объемная доля целесообразной добавки синтез-газа, составляющая 15 %, позволяет сократить эмиссию оксидов азота при горении в условиях газодинамического

противотока в 1,5 раза относительно горения метана во всем диапазоне по коэффициенту избытка воздуха. При добавлении к метану 15 % синтез-газа по объему в области режимов горения при коэффициенте избытка воздуха от 1 до 2,5 эмиссия несгоревших углеводородов снижается в 1,8 раза. В случае стехиометрического горения при коэффициенте избытка воздуха, равном 1,02, концентрация несгоревших углеводородов в продуктах сгорания синтез-газа по сравнению со сжиганием метана, уменьшается в 42 раза.

В результате расчетных и экспериментальных исследований была разработана модель противоточного горелочного устройства, осуществляющая низкоэмиссионное сжигание топливной смеси метана и синтез-газа в широком диапазоне коэффициента избытка воздуха.

Литература

1. **Евдокимов О.А., Гурьянов А.И.** Исследование динамики выгорания топлива в камерах сгорания ГТД и устройствах энергетического назначения // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. 2013. № 4 (27). С. 36—42.
2. **Бирюк В.В., Веретенников С.В., Гурьянов А.И., Пиралишвили Ш.А.** Вихревой эффект. Технические приложения. Т. 2 (Часть 1). М.: Научтехлитиздат, 2014. 288 с.

A.I. Gur'yanov, V.V. Kononova

Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia, 152934, Rybinsk, Pushkina str., 53

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BURNING OF MIXED AND SYNTHETIC FUEL COUNTERFLOW BURNER MODULE

УДК 662.612

Е.А. Кузнецов, Е.С. Коковина, А.Ю. Снегирев*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: kn0egor@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕГОСЯ ГОРЕНИЯ ТЕРМОПЛАСТИКА: РОЛЬ СЕТОЧНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ГРАДИЕНТОВ У ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА

Практическое моделирование турбулентного горения при пожаре не позволяет достичь точного пространственного разрешения внутренней структуры нестационарных фрагментов ламинарного пламени, присоединенных к поверхности горючего материала. Это приводит к большим ошибкам в результатах численных расчетов самоподдерживающегося горения твердых горючих материалов, для которого характерна определяющая роль конвективного потока на поверхности. Данная работа нацелена на создание подсеточной модели для расчета конвективного теплового потока от фрагмента ламинарного пламени к поверхности горючего материала.

Предыдущий опыт расчетов показал, что если расчетные сетки разрешают крупномасштабные структуры турбулентного пламени, то FDS [1] и ANSYS FLUENT (совместно с Pyropolis [2]) с хорошей точностью предсказывают время задержки зажигания и скорость выгорания в случае интенсивного внешнего нагрева материала, когда роль конвективного теплового потока мала. Однако в отсутствие внешнего теплового потока роль конвективного потока от пламени к поверхности горючего материала существенно возрастает, и разрешающая способность сетки становится недостаточной.

Чтобы избежать необходимости использования значительно более мелких сеток, значение конвективного потока определяется на подсеточном уровне. При этом учитывается возможность существования в пристеночной ячейке фрагмента ламинарного пламени, температура которого оценивается с учетом концентрации кислорода в ячейке. Воспламенение и погасание пристеночного фрагмента пламени определяется предельным значением массового расхода летучих, образующихся при пиролизе горючего материала. До воспламенения и после погасания (массовый расход летучих меньше предельного) конвективный поток определяется с учетом молекулярной и подсеточной турбулентной теплопроводности в пристеночной ячейке.

Данный метод внедрен в пользовательские функции для ANSYS FLUENT, которые обеспечивают использование модели Pyropolis [2] в качестве граничного условия на поверхности горючего материала. Библиотека Pyropolis выполняет расчет теплопередачи и пиролиза твердого горючего мате-

риала и по данным о тепловых потоках из газовой фазы к поверхности определяет скорость образования летучих.

С помощью ANSYS FLUENT и Pyropolis выполнен расчет горения пластины термопластика при радиационном нагреве в конусном калориметре [3] и в самоподдерживающемся режиме, когда нагрев отключен. Материал пластины — полиметилметакрилат (ПММА), нагреваемая поверхность 0,1×0,1 м, толщина слоя 8,5 мм. Поверхность нагревателя поддерживается при постоянной температуре, обеспечивающей падающий радиационный тепловой поток на поверхности пластины 52 кВт/м^2. Рассматриваемый сценарий соответствует экспериментальным условиям. Турбулентность и горение моделируются методом крупных вихрей (модель Смагоринского—Лилли) и моделью диссипации вихрей. Расчет лучистого переноса выполняется методом дискретных ординат. Спектральные свойства продуктов сгорания (H_2O, CO_2 и сажа) учитываются по методу взвешенной суммы серых газов. Образование сажи рассчитывается по модели Мосса—Брукса.

Результаты расчета показали, что даже на достаточно грубой сетке используемая пристеночная функция позволяет воспроизвести экспериментально наблюдаемую скорость выгорания рассматриваемого материала при его самоподдерживающемся горении.

Работа выполнена с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический» и при частичной поддержке гранта РНФ № 16-49-02017.

Литература

1. **Snegirev A., Kokovina E., Tsoy A.** Coupled simulations of turbulent flame and pyrolysis of combustible material // Proceedings of the European Combustion Meeting – 2015, Paper P4-16, 30 March – 2 April, 2015, Budapest, Hungary.
2. **Snegirev A., Talalov V., Stepanov V., Harris J.** A new model to predict pyrolysis, ignition and burning of flammable materials in fire tests // Fire Safety Journal. 2013. 59. 132—150.

E.A. Kuznetsov, E.S. Kokovina, A.Yu. Snegirev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

NUMERIACAL SIMULATION OF SELF-SUSTAINED BURNING OF THERMOPLASTICS: THE INFLUENCE OF NEAR-WALL RESOLUTION OF TEMPERATURE GRADIENTS

УДК 620.91

В.А. Кузнецов[1]*, *М.Ю. Чернецкий*[2]

[1]Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
*e-mail: victor_partner@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ПРИ ГОРЕНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ С ВИХРЕВОЙ ГОРЕЛКОЙ НА ОСНОВЕ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Численное моделирование топочных устройств является на сегодняшний день одним из важнейших способов получения наиболее представительной информации об аэродинамике, локальном и суммарном теплообмене. Несмотря на большие успехи, достигнутые в развитии численного эксперимента, большое разнообразие, до конца не изученная структура угля и сложные химические процессы, происходящие при горении угольного топлива, не позволяют создать универсальных моделей. Поэтому остается актуальной задача поиска математических моделей с использованием существующих экспериментальных данных по углям и создания на их основе комплексной модели для расчета топочной камеры, что позволит более точно описать процессы горения пылеугольного топлива в топочно-горелочных устройствах.

Актуальным становится нахождение не только среднего поля величин в каком-либо процессе, но и различных пульсационных характеристик. Например, исследование горения пылеугольного факела и процессов, протекающих в нем, тесно связаны с рассмотрением пульсаций скорости и температуры в объеме. Задачи такого рода приводят к нестационарной формулировке методов моделирования.

Для расчетных исследований и верификации математической модели был выбран огневой стенд мощностью 2,4 МВт с вихревым горелочным устройством [1]. Результаты эксперимента [1] включают в себя профили скоростей, пульсационные составляющие скорости, значения температур и газовый состав в нескольких поперечных сечениях топочной камеры.

Для численного моделирования турбулентного течения несжимаемой жидкости использовался метод DES на основе k-w SST модели Ментора [2] с учетом межфазного взаимодействия. Решение уравнения переноса лучистой энергии базировалось на P1 аппроксимации метода сферических гармоник для серой двухфазной двухтемпературной среды. Для описания про-

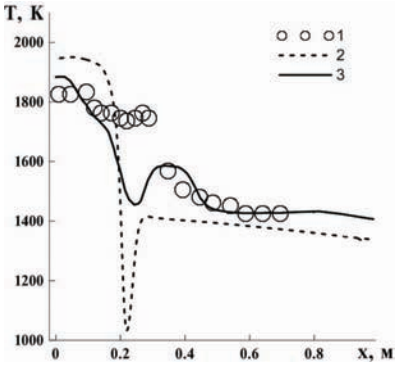


Рис. 1. Распределение температуры в сечении z = 0.25 м: *1* — эксперимент; *2* — RSM RANS; 3 — *k-w* SST DES

цессов движения частицы используется метод Лагранжа. Процесс горения угольной частицы представлялся в виде последовательных этапов: испарение влаги из топлива, выход и горение летучих компонент, горение коксового остатка.

Результаты расчетов показали, что метод DES позволяет корректно воспроизвести среднее поле температуры и скорости при расчете вихревой горелки. Распределение температуры совпадает с экспериментальными данными, и провал в области границы факела значительно меньше полученного RANS моделями (рис. 1). Было установлено, что выбор метода моделирования турбулентности при расчете горения пылеугольного топлива с закруткой потока оказывает существенное влияние на результаты численного эксперимента.

Литература

1. **Peters A.A.F., Weber R.** Mathematical Modeling of a 2.4 MW Swirling Pulverized Coal Flame // Combustion Science and Technology. 1997. Vol. 122. Is. 1—6. P. 131—182.
2. **Strelets M.** Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows // AIIA Paper. – 2001. No 2001-0879. 19 p.

V.A. Kuznetsov[1], *M.Y. Chernetskiy*[2]

[1] Siberian Federal University,
Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny SB RAS, 79
[2] Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1

NUMERICAL STUDY OF HEAT AND MASS TRANSFER AND COMBUSTION OF PULVERIZED COAL IN THE COMBUSTION CHAMBER WITH A SWIRL BURNER ON THE BASIS OF RANS/LES APPROACHES

УДК [535.233:662.613:662.641]:621.18

В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Е.И. Маратканова*

Вятский государственный университет,
610000, г. Киров, ул. Московская, 36

*e-mail: ZagrayIA@yandex.ru

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПЫЛЕВОМ СЖИГАНИИ ТОРФА В ТОПКЕ ПАРОВОГО КОТЛА БКЗ-210-140Ф

Одним из направлений развития экономики и энергетики Кировской области является применение торфяного топлива. В данной работе проводится комплексное исследование теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания (ГПС) при пылевом (факельном) сжигании фрезерного торфа в топке парового котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4.

Для определения химического состава, оптических свойств и дисперсности частиц шлака и золы проведен отбор проб в разных частях котловой системы (в шлаковой ванне, под общим «коллектором» и в скруббере).

С помощью метода рентгенофлуоресцентной спектрографии установлено, что в шлаке и золе содержатся оксиды Fe_2O_3, SiO_2, CaO, Al_2O_3 и др. На основании химического состава образцов найдены и представлены зависимости оптических констант (показателя преломления n_1 и поглощения n_2) от длины волны. Методом электронно-сканирующей микроскопии определены формы и размеры частиц шлака и золы. Построены гистограммы и функции распределения частиц по размерам. Для данных частиц выбрано логарифмически-нормальное распределение с соответствующими параметрами функции $f(x)$. Химический состав и дисперсность золы оказывают влияние на применяемые методы золоудаления и способы решения проблем шлакования топки котла.

С помощью разработанной методики комплексного исследования теплового излучения ГПС проведены вычислительные эксперименты по нахождению радиационных характеристик и характеристик излучения (ХИ). Исходными данными при вычислении являлись температура, давление, массовая доля, химический состав газовой фазы и частиц торфяной золы, оптические константы и дисперсность частиц (рис. 1). Для аналитического расчета горения торфа использовался элементарный состав топлива на рабочую массу: W^p = 55,1 %, A^p = 6,6 %, C^p = 21,7 %, H^p = 2,3 %, O^p = 13,2 %, N^p = 1,0 %, S^p = 0,1 %. Для компонентов газовой фазы рассчитаны коэффициенты поглощения с использованием информационной системы Spectra (http://spectra.iao.ru).

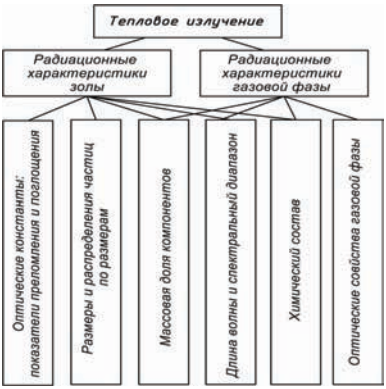


Рис. 1. Факторы, определяющие тепловое излучение ГПС и радиационные характеристики

Для решения интегро-дифференциального уравнения (ИДУ) переноса энергии излучения использовался метод сферических гармоник в P_3-приближении для условий одномерной геометрии.

С помощью математического моделирования исследовались спектральные и интегральные ХИ продуктов сгорания при пылевом сжигании торфа в котле БКЗ-210-140Ф.

Установлена зависимость ХИ (плотностей потоков и степеней черноты) от толщины излучающего слоя, массовой доли конденсированной фазы, химического состава газовой и конденсированной фазы, функции распределения частиц по размерам, уровня температуры и длины волны излучения.

Полученные результаты по ХИ необходимы для пирометрического определения температуры продуктов сгорания. Информация по степени черноты во всем спектральном диапазоне излучения позволяет выбрать спектральный интервал для корректного определения температуры ГПС. При этом необходимо учитывать спектральную чувствительность приемника излучения используемого оптического прибора (радиометра или пирометра).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-48-02482 р_поволжье_а.

V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, E.I. Maratkanova

Vyatka State University,
Russia, 610000, Kirov, Moscovskaya str., 36

A COMPREHENSIVE STUDY OF THERMAL RADIATION FROM PULVERIZED PEAT COMBUSTION IN THE FURNACE OF BKZ-210-140F STEAM BOILER

УДК 533.6.08, 536.46

А.С. Лобасов[1,2]*, *В.М. Дулин*[1,2], *Л.М. Чикишев*[1,2], *Д.М. Маркович*[1,2]

[1]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
[2]Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
*e-mail: alexey.lobasov@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ В ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУЕ ПАНОРАМНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В настоящее время для стабилизации пламени часто используется закрутка потока, что позволяет обеспечить устойчивое горение в относительно небольшом объеме, а также способствует достижению хороших характеристик поджига смеси в широком диапазоне рабочих расходов ее компонент [1, 2]. Методы анемометрии по изображениям частиц (англ.: particle image velocimetry, PIV) и плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (planar laser-induced fluorescence, PLIF) являются стандартными инструментами для исследования гидроаэромеханики турбулентных течений и потоков с горением [3, 4] и позволяют получить детальную информацию о когерентных структурах в потоке и их влиянии на тепломассообмен и горение.

В данной работе был использован метод PIV в стереоскопической конфигурации для измерений реализаций поля мгновенной скорости. Система состояла из импульсного Nd:YAG лазера Quantel EverGreen 200 (с двумя излучателями, энергия импульсов каждого 200 мДж) и двух ПЗС камер ImperX IGV-B2020 (размер кадра: 2060×2056 пикселей).

Для исследования структуры течения и деформаций фронта пламени были использованы две различные PLIF системы для анализа пространственных распределений гидроксила OH* и формальдегида HCHO в потоке с горением. В случае измерений распределения радикалов OH* вторая (532 нм) гармоника импульсного твердотельного Nd:YAG лазера (Quanta-Ray, 10 Гц, 1 Дж) была использована для накачки перестраиваемого лазера на красителях (Sirah, в качестве красителя использовался Rhodamine 6G). Энергия лазерного излучения, в диапазоне длин волн 283—284 нм, составляла 8 мДж. Третья гармоника (355 нм) твердотельного импульсного Nd:YAG лазера (Quantel Brilliant B, энергия одного импульса составляла 45 мДж) была использована для возбуждения флуоресценции формальдегида.

Для регистрации сигнала флуоресценции OH* был использован электронно-оптический преобразователь и усилитель (LaVision IRO) с фотокатодом S20 (multialkali), подключенный к 16-битной камере с гибридной ПЗС-КМОП матрицей (sCMOS) (размер кадра: 2560×2160 пикселей). На фотокатод электронно-оптического преобразователя сигнал PLIF фокусиро-

вался кварцевым объективом (LaVision UV-lens, f#2.8, 100 мм). Флуоресценция НСНО фиксировалась другой регистрирующей системой, состоящей из 16-битной интенсифицированной камеры (Princeton instruments PI-MAX-4) с аналогичным фотокатодом (размер кадра: 1024×1024 пикселей), оснащенной объективом Sigma AF #50. В обоих случаях время экспозиции каждого кадра составляло 200 нс. На объективах были установлены соответствующие полосно-пропускающие оптические фильтры.

Лазерные пучки лазеров были развернуты в коллимированный нож, шириной 50 мм и толщиной менее 0,8 мм. Нож проходил через ось симметрии горелочного устройства. Установлено, что во внутреннем слое смешения (вокруг центральной зоны рециркуляции) закрученной струи формировались крупные вихри, которые деформировали фронт пламени, а также способствовали тепломассообмену между продуктами горения в центральной зоне рециркуляции и свежей смесью, поступающей вместе со струей.

Литература

1. **Gupta A., Lilley D., Syred N.** Swirl Flows// Abacus Press. Kent. 1984.
2. **Weber R., Dugué J.** Combustion accelerated swirling flows in high confinements// Progress in Energy and Combustion Science. 1992. 18. P. 349—367.
3. **Hassel E.P. and Linow S.** Laser Diagnostics for Studies of Turbulent Combustion// Measurement Science and Technology. 2000. Vol. 11. No 2. P. R37—R57.
4. **Eckbreth A.C.** Laser Diagnostic for Combustion Temperature and Species// Gordon and Breach. Netherlands. 1996.

A.S. Lobasov[1,2]*, V.M. Dulin*[1,2]*, L.M. Chikishev*[1,2]*, D.M. Markovich*[1,2]

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1
[2]Novosibirsk State University,
Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2

INVESTIGATION OF TURBULENT COMBUSTION IN A SWIRLING JET BY USING PLANAR OPTICAL METHODS

УДК 532.5

И.В. Мирошниченко, М.А. Шеремет

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

ТУРБУЛЕНТНЫЕ РЕЖИМЫ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ И ТЕПЛОВОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАМКНУТОМ КУБЕ

Исследования совместных эффектов теплового поверхностного излучения и турбулентной естественной конвекции в замкнутых областях бурно развиваются в наши дни [1–4]. Это связано с ростом приложений в сфере электроники, строительства и машиностроения, которые требуют передачи больших потоков тепла и массы в ограниченном объеме. Большое значение представляет исследование влияния силы плавучести и степени черноты ограждающих конструкций на структуру течения, а также на распределения локальных и интегральных характеристик.

Данная работа посвящена численному исследованию влияния приведенной степени черноты и числа Рэлея на турбулентные режимы естественной конвекции и теплового поверхностного излучения в замкнутой области. Актуальность рассматриваемой задачи обусловлена возможностью применения полученных результатов исследования для совершенствования существующих методик расчета конвективно-радиационного теплопереноса для областей с большими характерными размерами.

Рассматривается краевая задача теплопереноса за счет механизмов турбулентной естественной конвекции и поверхностного излучения в замкнутом кубе. Внутри куба находится газ, который считается ньютоновской жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска. При проведении моделирования предполагалось, что теплофизические свойства газа и стенок не зависят от температуры. Режим течения турбулентный. Теплообмен излучением моделируется на основе приближения поверхностного излучения. Поверхности стенок считаются диффузно-серыми.

Процесс переноса массы импульса и энергии описывается системой нестационарных трехмерных дифференциальных уравнений конвекции в приближении Буссинеска. Для получения более точных значений искомых параметров вблизи стенки использовалась технология сгущения расчетной сетки к стенкам. В качестве модели турбулентности применялась стандартная k–ε модель [3, 4].

Сформулированная задача была решена методом конечных разностей. Разработанный алгоритм был подробно протестирован на ряде модельных задач свободно-конвективного теплопереноса [3, 4].

В результате проведенных исследований получены распределения интегральных и локальных параметров. Показано, что увеличение приведенной

степени черноты ограждающих стенок приводит к снижению интенсивности конвективного теплообмена на поверхности стенок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для молодых российских ученых (грант МД-2819.2017.8).

Литература

1. **Influence** of radiation effect on turbulent natural convection in cubic cavity at normal temperature atmospheric gas / T. Kogawa, J. Okajima, A. Sakurai et al. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. 104. 456—466.
2. **Rahimi M., Sabernaeemi A.** Experimental study of radiation and free convection in an enclosure with a radiant ceiling heating system // Energy Build. 2010. 42. 2077—2082.
3. **Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A., Mohamad A.** Numerical simulation of a conjugate turbulent natural convection combined with surface thermal radiation in an enclosure with a heat source // Int. J. Thermal Sciences. 2016. 109. 172—181.
4. **Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A.** Numerical simulation of turbulent natural convection combined with surface thermal radiation in a square cavity // Int. J. Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 2015. 25. 1600—1618.

I.V. Miroshnichenko, M.A. Sheremet

Tomsk State University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin ave., 36

TURBULENT NATURAL CONVECTION COMBINED WITH THERMAL SURFACE RADIATION IN A CUBICAL CAVITY

УДК 536.46

К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИИ АЭРОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

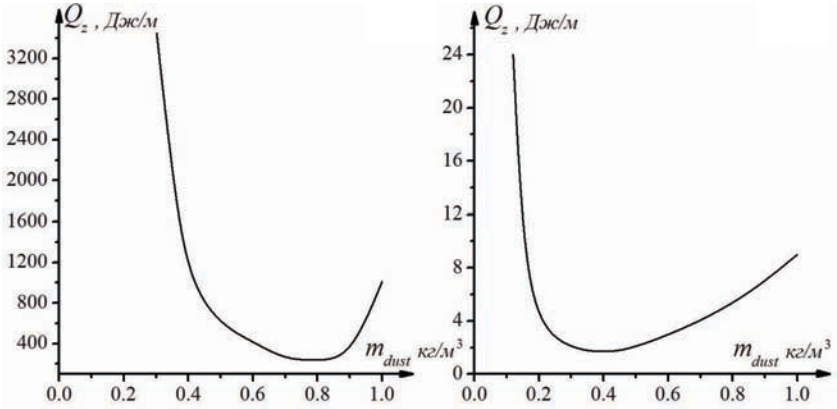
Задача об искровом зажигании газовзвеси угольной пыли актуальна для области пожаровзрывобезопасности угольной промышленности. Для учета особенностей теплового и инерционного взаимодействия между частицами и газом, возникающих на начальном этапе искрового зажигания, необходимо решать полную газодинамическую постановку задачи, учитывающую законы сохранения в газовзвеси. Целью настоящей работы являлось численное исследование задачи искрового зажигания аэровзвеси угольных частиц. В работе определялась величина минимальной энергии искрового разряда, необходимая для успешного зажигания газовзвеси разного состава.

Математическая постановка задачи формулируется для следующих допущений. Предполагается, что пылевое облако состоит из смеси воздуха с монодисперсной взвесью угольной пыли с массовой концентрацией m_{dust}. Нитевидный мгновенный источник зажигания расположен в центре. Правая граница расчетной области полагалась бесконечно удаленной от источника зажигания. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры. На поверхности частиц протекает гетерогенная реакция первого порядка по кислороду. Скорость гетерогенной химической реакции на частицах лимитируется коэффициентом массоотдачи β. Учитывается межфазное взимодействие между частицами и газом.

Математическая модель основана на двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды и определяется системой уравнений, состоящей из уравнений сохранения массы, импульса, полной энергии газа и частиц с учетом теплопроводности и диффузии в газе, а также химической реакции на поверхности частиц и уравнений выгорания частиц.

Уравнения, описывающие математическую постановку задачи, решались численно с использованием метода С.К. Годунова [1]. Слагаемые в правых частях уравнений, описывающие процессы переноса за счет механизмов теплопроводности и диффузии, аппроксимировались явно на трехточечном шаблоне. Для решения уравнений, описывающих процессы в газе, использовалась схема распада произвольного разрыва в параметрах состояния газа [1]. Для решения уравнений, описывающих процессы эволюции дисперсной фазы, использован расчет распада разрыва параметров в среде, лишенной собственного давления [2].

Была выполнена серия параметрических расчетов, в которых варьировались размеры r_k и массовая концентрация частиц m_{dust}. Результаты представлены на рис. 1. Согласно рис. 1 кривая, определяющая зависимость минимальной энергии зажигания от массовой концентрации угольной пыли имеет форму, напоминающую параболу – кривая имеет две выраженные ветви и «полочку». С увеличением размера частиц кривая, определяющая зависимость минимальной энергии зажигания от массовой концентрации частиц смещается вправо. Из сравнения рис. 1, *а* и *б* следует, что увеличение размеров частиц приводит к увеличению минимальной энергии искрового разряда, необходимой для успешного зажигания аэровзвеси угольной пыли.



а) *б*)

Рис. 1. Зависимость минимальной энергии зажигания аэровзвеси угольной пыли от массовой концентрации частиц: $r_k = 2 \cdot 10^{-6}$ м (*а*), $r_k = 10^{-7}$ м (*б*)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-33-60091 мол_а_дк.

Литература

1. **Численное** решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. М.: Наука, 1976. 400 с.
2. **Крайко А.Н.** О поверхностях разрыва в среде, лишенной «собственного» давления // ПММ. 1979. Т. 43. № 3. С. 500—510.

K.M. Moiseeva, A.Yu. Krainov

Tomsk State University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenina ave., 36

SIMULATION OF THE HEAT PROCESSES BY THE SPARK IGNITION OF THE AEROSUSPENSION OF COAL DUST

УДК 536.46

С.Г. Орловская, О.Н. Зуй, М.В. Лисянская*

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова,
Украина, 65082, Одесса, ул. Дворянская, 2

*e-mail: svetor25@gmail.com

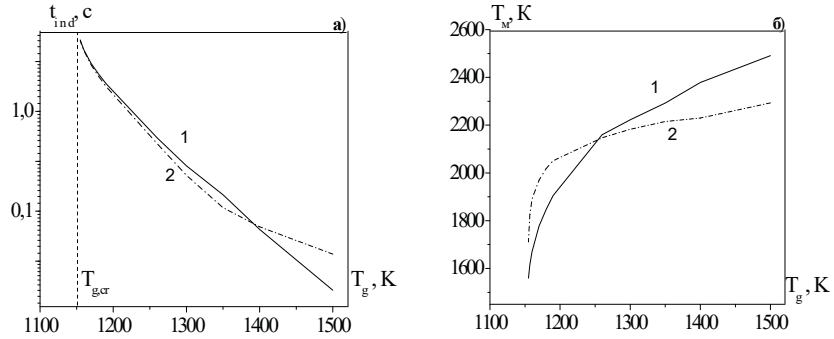
ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ДВУХФРАКЦИОННОЙ ГАЗОВЗВЕСИ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ

Актуальность исследований обусловлена необходимостью разработок эффективных методов использования диспергированных углеродных топлив в различных технологических процессах. Топливо, используемое в энергетических устройствах, содержит частицы разного размера. Целью работы является изучение закономерностей воспламенения и горения двухфракционной газовзвеси углеродных частиц как разновидности полидисперсного состава с размерами частиц, отличающимися между собой в несколько раз.

В работе проведено физико-математическое моделирование высокотемпературного тепломассообмена и кинетики химических превращений совокупности частиц в виде газовзвеси при различной температуре нагретого газа. Для расчетов выбрана двухфракционная газовзвесь с диаметрами частиц мелкой фракции d_{b1} = 60 мкм, крупной фракции d_{b2} = 120 мкм и равными массовыми концентрациями фракций ($C_{m1} = C_{m2} = 0{,}0122$ кг/м^3). Определялись такие характеристики высокотемпературных процессов, как время воспламенения частиц (период индукции), время и температура горения, критические температуры и диаметры, определяющие воспламенение и потухание.

На рис. 1 представлены результаты расчета для двухфракционной газовзвеси частиц в виде зависимостей периода индукции и максимальной температуры горения каждой из фракций от температуры газа. Видно, что для высоких температур газа T_g > 1400 K, мелкие частицы воспламеняются раньше, чем крупные (например, для T_g = 1500 K в 2 раза быстрее). При температурах T_g < 1400 K, период индукции частиц мелкой фракции больше, чем крупных, и при понижении температуры газа эта разница увеличивается. Это связано с тем, что для мелких частиц теплопотери молекулярно-конвективным путем возрастают сильнее за счет большего значения коэффициента теплоотдачи. При некоторой критической температуре газа T_{gcr} газовзвесь не воспламеняется (период индукции бесконечно большой). Критическая температура воспламенения газовзвеси значительно ниже, чем одиночных частиц того же размера (табл. 1). Причем критические температуры газа для одиночных крупных и мелких частиц существенно разнятся, а

в условиях двухфракционной газовзвеси практически совпадают. Понижение температуры воспламенения газовзвеси происходит вследствие разогрева газа окисляющейся совокупностью частиц при выделении тепла химических реакций. Для объяснения совпадения температур воспламенения крупной и мелкой фракций в условиях двухфракционной взвеси был проведен анализ концентрации кислорода в объеме газовзвеси. Получено, что вблизи критической температуры, при длительном окислении частиц газовзвеси, на этапе воспламенения концентрация окислителя уменьшается на 30÷40 %, что является недостаточным для самоускорения химических реакций на поверхности частиц. Другая причина — низкая температура газа, что не позволяет частицам прогреться до температуры самовоспламенения.



а) *б*)

Рис. 1. Зависимости периода индукции (*а*) и максимальной температуры горения (*б*) частиц газовзвеси от температуры газа: *1* — $d_{b1} = 60$ мкм; *2* — $d_{b2} = 120$ мкм

Таблица 1

Углеродная частица	Одиночная		Двухфракционная взвесь	
	$d_{b1} = 60$ мкм	$d_{b2} = 120$ мкм	$d_{b1} = 60$ мкм	$d_{b2} = 120$ мкм
$T_{g,cr}$, К	1367	1280	1160	1152

Из рис. 1, *б* следует, то в области высоких температур газа температура горения частиц мелкой фракции значительно выше, чем крупной; в области низких T_g она становится меньше по причине больших теплопотерь к газу.

S.G. Orlovskaya, O.N. Zuy, M.V. Lisyanskaya

Odessa National I.I. Mechnikov's University,
Ukraine, 65082, Odessa, Dvoryanskaya str., 2

IGNITION AND COMBUSTION OF DOUBLE FACTIONAL SUSPENSION OF CARBON PARTICLES

УДК 519.633.2

И.Ю. Савельева, А.В. Журавский*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

*e-mail: inga.savelyeva@gmail.com

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В ПЛАСТИНЕ ПРИ ГАЗОФАЗНОМ ОСАЖДЕНИИ МАТЕРИАЛА НА ЕЕ ПОВЕРХНОСТЬ

Газофазное осаждение является одним из видов аддитивных технологий и представляет собой нанесение на охлаждаемую поверхность непрерывного слоя материала, имеющего, в том числе, и нанокристаллическую структуру.

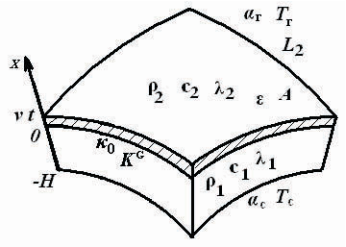


Рис. 1. Наращиваемая криволинейная пластина

В работе предложена модель теплопроводности, позволяющая учесть особенности теплообмена в процессе газофазного осаждения материала на криволинейную поверхность (рис. 1), а именно конвективный теплообмен, теплообмен излучением, тепло- и массообмен. В модели также учтено линейное изменение кривизны по толщине оболочки.

Для решения полученного уравнения построена разностная схема с использованием интегро-интерполяционного метода.

Получен алгоритм численного определения профиля температуры в любой момент времени, представлены примеры проведения расчетов и анализ результатов. Вычисления проведены для различных пар подложка—покрытие и для пластин различной кривизны. На основании проведенных расчетов сделаны выводы о зависимости распределения температуры в пластине от свойств материалов и геометрии пластины.

Литература

1. **Гусев А. И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
2. **Андриевский Р.А. Рагуля А.В.** Наноструктурные материалы. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 192 с.
3. **Костановский А.В., Гусев М.К.** Осаждение тонких пленок при вакуумтермическом испарении нитрида алюминия // ТВТ. 1995. Т. 33. № 1. С. 163—166.
4. **Электролитическое** осаждение металлов на алюминий и его сплавы / Ю.Я. Лукомский , Г.М. Прияткин, Т.В. Мулина и др. // Усп. хим. 1991. Т. 60. № 5. С. 1077–1103.

5. **Васильев В. Ю., Репинский С. М.** Осаждение диэлектрических слоев из газовой фазы // Усп. хим. 2005. Т. 74. № 5. С. 452—483.
6. **Суперкомпьютерное** моделирование современных процессов напыления оптических нанопокрытий / А.В. Тихонравов, И.В. Кочиков, Т.В. Амочкина и др. // Выч. методы и программирование. 2012. Т. 13. № 4. С. 491—496.
7. **Комаров Ф. Ф., Пилько В. В., Климович И. М.** Влияние условий нанесения наноструктурированных покрытий из Ti–Zr–Si–N на их состав, структуру и трибомеханические свойства // ИФЖ. 2015. Т. 88. № 2. С. 350—354.
8. **Марченко И. Г., Марченко И. И.** Недиффузионные механизмы атомного упорядочения при низкотемпературном осаждении меди // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89. № 7. С. 396—401.
9. **Кувыркин Г. Н., Журавский А. В., Савельева И. Ю.** Математическое моделирование газофазного осаждения материала на криволинейную поверхность // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 6. С. 1392—1297.
10. **Кувыркин Г. Н.** Термомеханика деформируемого твердого тела при высокоинтенсивном нагружении. М.: Изд-во МГТУ, 1993. 145 с.
11. **Дульнев Г. Н.** Теория тепло- и массообмена. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 195 с.
12. **Калиткин Н. Н.** Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
13. **Рябенький В. С.** Введение в вычислительную математику. М.: Наука, 1994. 336 с.
14. **Самарский А. А.** Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
15. http://libmetal.ru/

I.Yu. Savelyeva, A.V. Zhuravskii

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

HEAT CONDUCTION MODELING IN A PLATE DURING VAPOR DEPOSITION OF MATERIAL ON PLATE'S SURFACE

УДК 629.785

*М.О. Салосина**

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4
*e-mail: salosina.m@yandex.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ СОЛНЕЧНОГО ЗОНДА

Конструкции и системы, входящие в состав современных спускаемых космических аппаратов, солнечных и планетарных зондов, космических аппаратов, предназначенных для исследования ближайших к Солнцу небесных тел, работают в условиях интенсивных, часто экстремальных тепловых воздействий. Обеспечение требуемых тепловых режимов является одной из наиболее сложных проблем, возникающих при проектировании подобных систем.

Несмотря на успехи в области исследования тепловых режимов конструкций, создания легких теплозащитных и теплоизоляционных материалов, доля массы летательных аппаратов, которая приходится на тепловую защиту, остается значительной. Все более жесткие требования, предъявляемые к тактико-техническим характеристикам объектов ракетно-космической техники, делают актуальной проблему повышения весовой эффективности тепловой защиты.

Один из путей ее решения связан с оптимизацией структур теплозащитных материалов с целью достижения заданных свойств и наилучшего эффекта для конкретных условий эксплуатации материала.

В данной работе рассматривается методика проектирования тепловой защиты на основе высокопористых углеродных материалов, учитывающая зависимость теплофизических и радиационно-оптических характеристик теплозащитных материалов от их структуры.

Предлагаемый в работе подход к исследованию свойств теплозащитных и конструкционных материалов является двухуровневой идентификацией математических моделей, описывающих физические процессы в материалах при их нагреве и охлаждении.

На первом уровне по результатам экспериментального исследования нестационарного поля температуры в образцах определяются эффективные теплофизические характеристики материала на основе решения коэффициентной обратной задачи теплообмена [1]. Второй уровень исследований заключается в идентификации дополнительных физических характеристик материала – параметров комплексной модели физических свойств (электрических, спектральных и т.д.) [2].

Полученные результаты могут быть использованы для оптимального проектирования тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов,

спускаемых космических аппаратов, солнечных и планетарных зондов, космических аппаратов, предназначенных для исследования ближайших к Солнцу небесных тел за счет выбора геометрических параметров и структуры материалов тепловой защиты, что позволит существенно повысить ее весовую эффективность и надежность.

Литература

1. **Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M.** Estimating thermal and radiative properties of insulating materials // Inverse Problems in Science and Engineering. 2012. Vol. 20. Is. 5. P. 639—649.
2. **Alifanov O.M., Cherepanov V.V.** Identification of models and prediction of physical properties of highly porous heat-shielding materials // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2010. Vol. 83. Is. 4. P. 770—782.

M.O. Salosina

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoe sh., 4

DESIGN OF THERMAL PROTECTION OF SOLAR PROBE

УДК 621.45.022.7

К.Р. Тимофеева, М.М. Гурьянова

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва,
152934, г. Рыбинск, Пушкина ул., 53

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ОТРЫВНОГО ДИФФУЗОРА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКА В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ И ТЕЧЕНИЕМ В ОБЪЕМЕ ЖАРОВОЙ ТРУБЫ

В работе рассматривается отрывной диффузор кольцевой камеры сгорания ГТД, в котором вблизи сечения отрыва площадь диффузора резко увеличивается и отрыв потока не распространяется на всю длину. На начальном участке, представляющем укороченный диффузор, скорость снижается приблизительно до уровня 60 % скорости на входе. После резкого расширения воздух попадает в полость большего объема, где он разделяется на потоки, обтекающие жаровую трубу (ЖТ). Высота уступа за начальным участком составляет 0,1—0,15 высоты канала, но не менее 5 мм.

Зоны циркуляции, возникающие в области уступов, способствуют равномерному распределению потока вокруг ЖТ, обеспечивая минимальную чувствительность профиля скорости на выходе из КС от изменения и временных колебаний формы входного профиля скорости. ЖТ с фронтовым устройством (ФУ) являются для диффузора центральным телом, определяющим подпор потока в нем и гидравлику устройства в целом. Переход безотрывного течения к отрывному происходит при увеличении угла раскрытия диффузорного канала. При фиксированном угле раскрытия повышается газодинамическая устойчивость работы диффузора, поскольку в этом случае длина диффузора снижается, то увеличиваются потери полного давления до 50% и более по сравнению с плавными диффузорами.

Ранее в работах [1, 2] было проведено численное моделирование аэродинамики отрывного диффузора с несимметричным профилем скорости на входе, но без учета взаимодействия потока в кольцевых каналах и внутреннего течения в ЖТ. В работе акцентировано внимание на учете отмеченных условий течения.

Для постановки численного исследования выполнена 3D-модель проточной части 45º сектора отрывного диффузора КС. Построена сеточная модель проточного тракта отрывного диффузора, дискретизация которой выполнена в виде неструктурированной тетрагональной сетки, насчитывающей 2 468 795 ячеек.

Течение описывается системой уравнениями Навье—Стокса, осредненных по Рейнольдсу, которая замыкается двухпараметрической *k-w* SST мо-

делью турбулентности, качественно описывающей пристеночные течения и течения с большим градиентом давления.

Выполнено численное моделирование газодинамики диффузора КС в стационарной постановке при симметричном ($K = 1$) и несимметричном ($K > 1$ и $K < 1$) входном профиле скорости, определяемом коэффициентом несимметричности профиля скорости с учетом внутреннего течения в объеме ЖТ:

$$K = \frac{v_{ср}^{в}}{v_{ср}^{н}}, \qquad (1)$$

$v_{ср}^{в}$, $v_{ср}^{н}$ — среднерасходная скорость потока в верхнем и нижнем канале.

Оценка гидравлических потерь, потерь полного давления в КС с внутренним течением позволяет выделить потери в диффузоре от суммарных потерь через ФУ и потерь, вызванных взаимодействием потоков через кольцевые каналы и в объеме ЖТ. Определены интегральные параметры аэродинамической эффективности рабочего процесса отрывного диффузора КС:

- коэффициент гидравлических потерь $\xi = \dfrac{p_{вх}^{*} - p_{вых}^{*}}{\rho v_{вх}^{2} / 2}$ (2)

$p_{вх}^{*}$, $p_{вых}^{*}$ — полное давление на входе и выходе из диффузора; $\rho v_{вх}^{2}$ — динамический напор на входе в диффузор.

- коэффициент потерь полного давления $\sigma = \dfrac{p_{вых}^{*}}{p_{вх}^{*}}$. (3)

Литература

1. **Гурьянова М.М., Пиралишвили Ш.А., Веретенников С.В.** Аэродинамика камеры сгорания с отрывным диффузором // Авиакосмическое приборостроение. 2009. № 11. С. 1—7
2. **Гурьянова М.М., Пиралишвили Ш.А.** Влияние входной несимметричности профиля скорости и начальной интенсивности турбулентности на гидравлику отрывного диффузора камеры сгорания ГТД //Авиационная техника. 2016. № 2. С. 38—45.

K.R. Timofeeva, M.M. Guryanova

Rybinsk State University Aviation Technical,
Russia, 152934, Rybinsk, Pushkina str., 53

NUMERICAL MODELLING OF AERODYNAMIC FIOW IN A TURBOSHAFT ENGINE COMBUSTION CHAMBER FLOW-SEPARATED DIFFUSER THAT INCLUDES ANNUAL CHANNEI AND FUMACE FLOW INTERACTION

УДК 662.76

П.С. Филиппов, А.Ф. Рыжков*

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

*e-mail: fps_proxi@mail.ru

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПРИ ГОРЕНИИ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

В настоящее время метод численного моделирования в среде вычислительной гидродинамики (CFD-пакете) для исследования различных процессов массо- и теплопереноса интенсивно развивается. Такой интерес к численному моделированию обусловлен тем, что метод позволяет с достаточной точностью предсказать характеристики протекания различных процессов при минимальных материальных и временных затратах.

В численном моделировании процесса горения газового топлива важную роль в получении достоверных результатов (по профилю температур в рабочем участке, режимам протекания реакции горения, параметрам продуктов сгорания и т.д.) играет выбор моделей расчета процессов горения, турбулентности и лучистого теплообмена (перенос энергии излучением). Верификациям моделей расчета процессов горения и турбулентности в зависимости от условий протекания процесса горения газа посвящены ряд работ и публикаций. Работ по верификациям моделей расчета лучистого теплообмена относительно меньше. В данной работе представлена верификация моделей расчета переноса энергии излучением при горении газового топлива в цилиндрической диффузионной камере сгорания.

Выбор модели расчета переноса энергии излучением выполнялся между четырьмя наиболее популярными в CFD-пакетах моделями: 1) модель Rosseland; 2) модель P1; 3) модель Discrete Transfer; 4) модель Monte Carlo.

Модель Rosseland является упрощением уравнения переноса излучением, изложенным в [1], для толстой оптической среды. Модель включает в исходное уравнение переноса энергии новый коэффициент диффузии, зависящий от температуры.

Модель P1 также является упрощением уравнения переноса энергии излучением. Модель допускает, что интенсивность излучения изотропна. Полный вид уравнения переноса энергии излучением и вывод модели P1 представлены в работе [2].

Модель Discrete Transfer допускает, что диссипация энергии изотропна. Модель является упрощением спектрального уравнения переноса энергии излучением.

В модели Monte Carlo интенсивность излучения пропорциональна фазовому потоку фотонов. Средняя интенсивность излучения пропорциональна пройденному фотоном пути в единицу времени.

Верификация моделей расчета переноса энергии излучением проводилось на основе сравнения расчетных результатов, полученных в CFD-пакете, с результатами эксперимента и расчета, проведенного по известной инженерной методике [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00479мол_а

Литература

1. **Siegel R., Howell J.R.** Thermal Radiation Heat Transfer. Second Edition. New York: Hemisphere Publishing Cooperation, 1980. 833 p.
2. **Modest M.F.** Radiative Heat Transfer. Second Edition. Academic Press, 2003. 808 p.
3. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

P.S. Filippov, A.F. Ryzhkov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19

VERIFICATION OF THERMAL RADIATION MODELS AT FUEL GAS COMBUSTION IN COMBUSTION CHAMBER

УДК 544.452.42, 536.46

Д.К. Шараборин[1,2]*, *В.М. Дулин*[1,2], *Д.М. Маркович*[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
*e-mail: sharaborin.d@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ЗАКРУЧЕННОМ ПЛАМЕНИ

В работе представлено детальное экспериментальное исследование структуры течения, распределения плотности и концентрации основных компонент в турбулентном закрученном пламени при горении предварительно перемешанной смеси.

Закрутка потока была организована лопаточным завихрителем, установленном в осесимметричном сужающемся сопле. Диаметр выходного отверстия сопла составлял d = 15 мм. Число Рейнольдса потока закрученной струи составляло 5000. Степень закрутки равнялась 0,4 и 1,0. Из сопла поступала пропановоздушная смесь с коэффициентом избытка топлива 0,7. Экспериментальные исследования были проведены с использованием метода PIV в стереоскопической конфигурации и метода на основе регистрации интенсивности спонтанного комбинационного рассеяния (СКР).

Стереоскопическая PIV система состояла из двух объединенных импульсных Nd:YAG лазеров (Quantel, Ever Green) (70 мДж в импульсе на длине волны 532 нм) и пары 4Мпикс ПЗС камер (ImperX). Для расчета поля мгновенной скорости трассеров было использовано ПО «ActualFlow».

В качестве зондирующего излучения в экспериментах по регистрации интенсивности СКР использовались вторая и третья (532 и 355 нм) гармоники импульсного Nd:YAG лазера (Quanta-Ray). Для регистрации сигнала СКР использовалась интенсифицированная 16-битная камера с электронно-оптическим преобразователем (Princeton instruments PI-MAX-4).

Анализ структуры течения показал, что в сильно закрученном потоке (в том числе и без горения) имел место распад вихревого ядра с образованием центральной зоны рециркуляции в форме пузыря. Установлено, что во внутреннем слое смешения (вокруг центральной зоны рециркуляции) распространяются крупные вихри, которые деформируют фронт пламени, а также способствуют тепломассообмену между продуктами горения в центральной зоне рециркуляции и струей. В работе также измерено пространственное распределение плотности и профили концентрации основных компонент и температуры в потоке на основе СКР. Фотография пламени и поле средней скорости, а также распределения концентрации основных компо-

нент и температуры в потоке представлены на рис. 1. Распределения (представленные для двух поперечных сечений) показывают, что вблизи выхода из сопла по периферии потока истекает бедная пропановоздушная смесь, а фронт пламени на начальном участке струи стабилизирован во внутреннем слое смешения струи и имеет форму обратного конуса. С ростом расстояния от сопла градиент температуры в слое смешения закрученного потока размывается, и концентрация топлива в струе монотонно уменьшается.

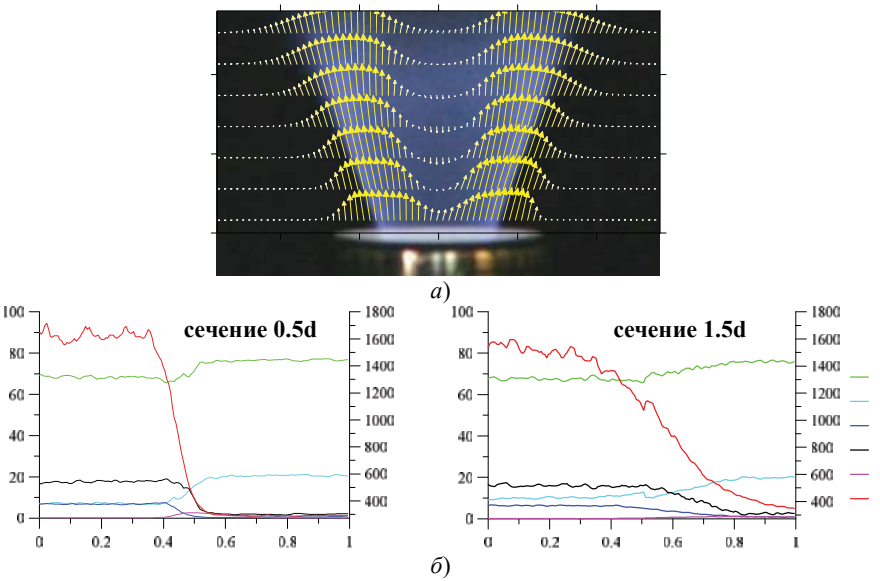


Рис. 1. Фотография пламени и поле средней скорости (*а*); распределения температуры и концентрации основных компонент газовой смеси в поперечных сечениях бедного пропановоздушного пламени с сильной закруткой (*б*)

D.K. Sharaborin[1,2], *V.M. Dulin*[1,2], *D.M. Markovich*[1,2]

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1
[2] Novosibirsk State University,
Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2

INVESTIGATION OF HEAT AND MASS TRANSFER IN A SWIRLING FLAME

УДК 536.21, 535.233

А.С. Шмыгалев, В.Н. Фасхиев, А.А. Лашова, Б.П. Жилкин*

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

*e-mail: a.s.shmygalev@urfu.ru

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИНФРАКРАСНЫХ СВЕТОВОДОВ ОТ СОСТАВА ИСХОДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Применение ИК световодов на основе кристаллов твердых растворов галогенидов серебра и таллия (I) $Ag_{1-x}Tl_xBr_{1-y}I_y$, $AgCl_xBr_{1-x}$ [1] для получения информации о температуре различных объектов является перспективной технической областью. При прохождении тепловой энергии через световод возникают потери, вносящие значительные погрешности при бесконтактном измерении температуры [2]. Исследование теплофизических свойств поликристаллических световодов позволит получить справочные данные, необходимые для технических расчетов этих потерь. В настоящей работе были исследованы кристаллические световоды составов $AgCl_{0,25}Br_{0,75}$, $AgCl_{0,5}Br_{0,5}$, $AgCl_{0,75}Br_{0,25}$, $Ag_{0,95}Tl_{0,05}Br_{0,95}I_{0,05}$. Методом [3] измерен коэффициент эффективной теплопроводности λ (рис. 1), который складывается из лучистой и молекулярной. При повышении температуры теплопроводность поликристаллов падает линейно, что вызвано усилением колебательного движения ионов структуры кристалла. Модифицированным flash-методом [4] получены коэффициенты температуропроводности *a*. В этом случае источником излучения служил элемент Пельтье, так как мощный лазерный импульс мог повредить матрицу приемного устройства. Для приближения эксперимента к адиабатным условиям была уменьшена толщина исследуемых образцов, которая составляла 300—400 мкм.

Полученные численные значения *a* для четырех химических составов ИК световодов представлены в таблице. Порядок полученных значений указывают на диэлектрическую природу материала. Внешний вид полученных кривых нагрева является типичным для метода лазерной вспышки.

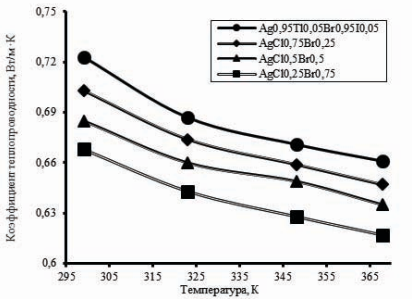


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности λ поликристаллических инфракрасных световодов на базе твердых растворов систем AgCl-AgBr, AgBr-TlI от температуры *T*

Значения удельной теплоемкости C_y, рассчитанной по формуле $C_y = \lambda/(\rho\, a)$, и плотности ρ, определенной методом гидростатического взвешивания, приведены в таблице. C_y увеличивается с ростом атомарной массы вещества: так, увеличение доли более «тяжелого» по сравнению с хлором, брома приводит к росту удельной теплоемкости в ряду составов на основе галогенидов серебра, а введение в состав таллия и йода приводит к резкому увеличению значения теплоемкости.

Таблица. Теплофизические свойства инфракрасных световодов на основе твердых растворов галогенидов серебра и одновалентного таллия при температуре 300 К

Состав	$AgCl_{0,25}Br_{0,75}$	$AgCl_{0,5}Br_{0,5}$	$AgCl_{0,75}Br_{0,25}$	$Ag_{0,95}Tl_{0,05}Br_{0,95}I_{0,05}$
Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·К)	0,668	0,685	0,709	0,723
Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^7$, $м^2/с$	1,583	1,531	1,624	1,040
Плотность ρ, $кг/м^3$	6185	6411	5639	7970
Удельная теплоемкость C_y, Дж/(кг·град)	682,27	697,93	774,21	872,26

В перспективе исследование теплофизических свойств позволит уточнить механизм переноса теплоты в зависимости от состава и направленно синтезировать материалы для ИК световодов, охарактеризовать тепловую инертность галогенидов серебра, их способность поглощать теплоту, описать потери проходящих волн, ввести поправочные коэффициенты с целью исключения погрешностей при бесконтактных измерениях температуры.

Литература

1. **Жукова Л.В., Корсаков А.С., Врублевский Д.С.** Новые инфракрасные материалы: кристаллы и световоды. Екатеринбург: Урал, 2014. 280 с.
2. **Шмыгалев А.С., Жилкин Б.П., Корсаков А.С.** Пропускание ИК-излучения световодами из твердых растворов галогенидов серебра // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 17. С. 1—8.
3. **Шмыгалев А.С., Фасхиев В.Н., Жилкин Б.П.** Определение коэффициента теплопроводности материала в цилиндрических образцах малого диаметра // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика [В печати].
4. **Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P.** Flash Method of Determining Thermal Diffusivity Heat Capacity and Thermal Conductivity // J. Appl. Phys., 1979. 32 с.

A.S. Shmygalev, V.N. Faskhiev, A.A. Lashova, B.P. Zhilkin

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia, 620002, Yekaterinburg, Mira str., 19

THE INFLUENCE OF THE ORIGINAL CRYSTAL COMPOSITION ON THE IR FIBER THERMAL PROPERTIES

Секция 4



Методы экспериментальных исследований процессов тепло- и массообмена

УДК 533.696.7

Д.С. Амбарцумян, Э.Б. Василевский, И.В. Ежов

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского,
140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, 1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВСТРЕЧНОГО ВДУВА ГАЗА ЧЕРЕЗ ПЕРЕДНЮЮ КРОМКУ СЛАБО ПРИТУПЛЕННОГО КЛИНА В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПОТОК

Полет летательного аппарата в атмосфере со скоростью порядка нескольких километров в секунду сопровождается значительным повышением температуры воздуха за ударной волной. В ряде случаев температура поверхности обтекаемого тела существенно превышает температуру разрушения всех известных и потенциально перспективных материалов.

В данной работе рассматривается задача активной тепловой защиты острой кромки летательного аппарата или воздухозаборника путем вдува газообразного вещества через щель навстречу потоку. Вдуваемые в поток газы частично оттесняют горячий пограничный слой и, тем самым, существенно (в несколько раз) уменьшают тепловой поток к поверхности тела. При таком способе защиты практически нет ограничений на допустимый конвективный тепловой поток и длительность процесса воздействия потока газа на тело. Важным положительным свойством этого метода является возможность многократного использования конструкции.

Целью данного исследования является экспериментальное изучение физических процессов, протекающих при вдуве вещества в высокоскоростной поток газа (воздуха): структуры потока, обтекающего тело; теплообмен потока с телом; течение вдуваемых веществ, оценки влияния вдува на аэродинамические характеристики обтекаемого тела.

Рассматривается течение и распределение теплообмена на поверхности острого клина с углом полураскрытия 20 град и длиной подводящего канала вдоль оси модели L = 77 мм, при высоте модели в кормовом сечении 30 мм. Высота щели канала подачи H_s = 0,2 мм. Условия набегающего потока в выходном сечении сопла трубы АДТ УТ-1М ЦАГИ при числе Маха набегающего потока M_∞ = 6, давлении в форкамере P_0 = 15 атм, температура торможения потока воздуха T_0 = 800 К. Полное давление вдуваемого газа $P_в$ = 4, 6, 8, 16 атм.

Результаты представлены в виде теневых фотографий и распределения чисел Стантона по поверхности клина.

Данная работа выполнена при поддержке Фонда фундаментальных исследований России (РФФИ), гранты № 14-08-00971 и 14-08-00793.

Литература

1. **Черный Г.Г.** Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Физматлит, 1959. 220 с.
2. **Полежаев Ю.В.** Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 92 с.
3. **Василевский, Э.Б.** Физические процессы при активной тепловой защите гиперзвуковых летательных аппаратов: Дисс… канд. техн. наук. Жуковский: ЦАГИ, 2006. 298 с.

D.S. Ambartsumyan, E.B. Vasilevskii, I.V. Ezhov

Central Aerohydrodinamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky,
Russia, 140180, Zhukovsky, Zhukovskogo str., 1

EXPERIMENTAL STUDY OF COUNTER-INJECTION OF COOLING GAS THROUGH THE ANTERIOR EDGE OF WEAKLY BLUNTED WEDGE IN HIGH-SPEED FLOW

УДК 536.24

А.А. Анисин, В.Н. Сапич

Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50-лет Октября, 7

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ ПОВЕРХНОСТИ ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМЫХ ПУЧКОВ ТРУБ И ПРОФИЛИРОВАННЫХ КАНАЛОВ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Известным направлением при создании и производстве компактных и эффективных теплообменных аппаратов и устройств является широкое применение различных трубчатых и высокотехнологичных профильных пластинчатых поверхностей со сложной формой и геометрией, обеспечивающих наиболее благоприятные условия физического взаимодействия потока теплоносителя с поверхностью, образование отрывного характера течения и организованных вихревых структур, интенсифицирующих теплообмен в пучках труб и профилированных каналах.

С использованием полученных на основе разносторонних экспериментальных исследований опытных данных по теплоотдаче и аэродинамическому сопротивлению [1—3] выполнено сравнение теплоэнергетической эффективности в виде зависимости $Q/F\Delta\bar{t} = \alpha = f(Q/N\Delta\bar{t})$ для поверхности поперечно обтекаемых базовых шахматного и коридорного пучков с оптимальной компоновкой гладких латунных труб одинакового диаметра d_1, коридорных симметричных пучков труб переменного сечения с разновеликими чередующимися вдоль оси цилиндрическими участками с $d_1/d_2 > 1$ с различными шагами и расположением в рядах, а также эффективности профилированных каналов пластинчатых модельных теплообменников ($d_э \approx d_1$) с контактирующими сфероидальными выступами и впадинами с шахматной и коридорной схемами расположения, имитирующими в определенном плане короткие поперечно обтекаемые трубчатые элементы с переменным по высоте радиусом образующей.

На основании полученных расчетных комплексных характеристик $Q/F\Delta\bar{t} = \alpha = C/(Q/(N\Delta\bar{t})^r$ и проведенного сопоставления показателей тепловой эффективности различных вариантов поперечно обтекаемой потоком воздуха трубчатой поверхности с разной геометрией установлено преимущество энергетической эффективности коридорных пучков цилиндрических труб переменного сечения по сравнению с показателями пучков прямых труб одинакового диаметра.

Вместе с тем сравнение теплоэнергетической эффективности соответствующих вариантов трубчатой и профильной пластинчатой поверхностей с

близкими значениями коэффициента компактности и одинаковыми схемами расположения труб и сфероидальных выштамповок показало, что по мере увеличения массовой скорости потока теплоносителя (уменьшения энергетического коэффициента $Q/N\Delta\bar{t}$) эффективность теплоотдачи поверхности профилированных каналов существенно опережает показатели трубчатой поверхности. При этом более высокой эффективностью (как и в пучках труб) обладает поверхность каналов с шахматной схемой расположения контактирующих элементов рельефа. Материалы проведенных обширных исследований [1—3] позволяют отметить сходство в механизмах теплообмена и аэродинамики в пучках относительно длинных прямых труб и в каналах пластинчатых теплообменников с контактирующими сфероидальными выступами, работающими как короткие поперечно обтекаемые пучки труб переменного сечения. Причем вихревой поток с дополнительным интенсифицирующим воздействием обтекает сплошную поверхность профилированного канала на всем своем пути в отличие от трубных пучков, где он обрывается после каждого поперечного ряда.

Результаты исследований и полученные уравнения подобия теплоотдачи и аэродинамического сопротивления для трубчатых и пластинчатых поверхностей могут быть использованы при решении прикладных задач. Продолжение экспериментальных исследований характеристик конвективных поверхностей со сложной конфигурацией методом полного теплового моделирования позволит более конкретно оценить их теплоэнергетические достоинства и возможность практического применения в теплообменниках.

Литература

1. **Анисин А.А.** Эффективность поперечно обтекаемой трубчатой поверхности с различной формой и геометрией // Справочник. Инженерный журнал. 2009. № 7. С. 59—64.
2. **Анисин А.А.** Интенсификация теплообмена в профилированных каналах пластинчатых теплообменников: монография. Брянск: Изд-во БГТУ, 2008. 152 с.
3. **Анисин А.А.** Обеспечение энергетической эффективности профилированных каналов пластинчатых теплообменников с дистанционирующими профильными пластинами-турбулизаторами // Тепловые процессы в технике. 2012. № 9. С. 386—393.

A.A. Anisin, V.N. Sapich

Bryansk State Technical University,
Russia, 241035, Bryansk, bulvar 50-let Oktyabrya, 7

THE HEAT EXCHANGE SURFICE EFFICIENCY OF TRANSVERSELY STREAMLINED TUBULAR BUNDLES AND SHAPE PASSAGES WITH DIFFICULT GEOMETRY IN AIR STREAM

УДК 621.18

И.С. Ануфриев[1], *А.П. Папулов*[1,2], *Е.Ю. Шадрин*[1], *О.В. Шарыпов*[1]

[1]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 1
[2]Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ АЭРОДИНАМИКИ МОДЕЛИ ЧЕТЫРЕХВИХРЕВОЙ ТОПКИ

В работе исследуется перспективная конструкция пылеугольной топки котла с четырехвихревой схемой компоновки горелок [1]. Топка представляет из себя прямоугольную экранированную камеру сгорания с распределенными по периметру соплами подачи пылеугольной смеси, установленными в несколько ярусов. На боковых стенках установлены по два диагонально направленных блока горелок, которые приближены к оси симметрии боковых стенок так, чтобы отношение расстояния между ними к высоте горелок составляло 0,8—1,2. На фронтовых и тыловых стенках по центру расположены сопла вторичного и третичного дутья, выполненные в виде вертикальных пристенных щелей, равных по высоте горелочному блоку и ориентированных относительно друг друга в противоположные стороны вдоль стен, на которых они расположены. Первичное сжигание топлива происходит в прямоточной части факела боковых горелок. Далее прямоточные части факела, направленные от боковых стенок навстречу друг другу, соударяясь, турбулизируют поток и благодаря наличию сопел вторичного и третичного дутья образуют четыре вихревых потока с вертикальными осями вращения, в которых происходит эффективное дожигание топлива.

Четырехвихревая схема сжигания пылеугольного топлива была разработана для котла БКЗ-320-140 ст. № 18 Красноярской ТЭЦ-1 с переводом его с жидкого на твердое шлакоудаление, а также была реализована при реконструкции топок котлов первой очереди Гусиноозерской ГРЭС БКЗ-640-140-ПТ. Практика показала, что сжигание высокозольных углей в топках котлов БКЗ приводит к интенсивному шлакованию топки и пароперегревателя, в результате чего котлы несут пониженную нагрузку.

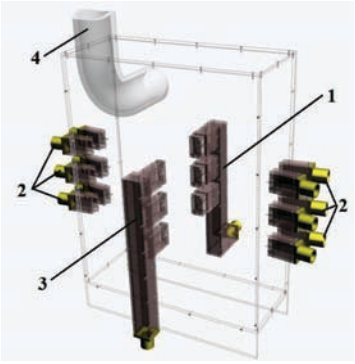


Рис. 1. Схема модели четырехвихревой топки: *1* — фронтальные сопла; *2* — боковые сопла; *3* — задние сопла (третичный воздух); *4* — вентиляция

Оценка эффективности реконструкции котлов выявила ряд недостатков в работе котла, требующих дальнейшей его модернизации. Для повышения технико-экономических и экологических показателей необходима оптимизация режимных и конструктивных параметров четырехвихревой топки пылеугольного котла, требующая детального изучения ее аэродинамики на лабораторных моделях.

В работе на основе физического моделирования с использованием бесконтактных оптических методов измерений (ЛДА, PIV) исследована структура потока в модели (масштаб 1:25) четырехвихревой топки, схема которой представлена на рис. 1. В результате проведения экспериментов получена информация о распределении скорости в различных сечениях модели. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для верификации математических моделей расчета топочных процессов в топке реального размера.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00137-П).

Литература

1. **Патент** РФ № 2032853. Призматическая экранированная топка / Патентообладатель: Сибирский филиал ВТИ. Авторы: С.В. Срывков, М.Я. Процайло, А.А. Дектерев, С.Г. Козлов, М.С. Пронин, А.М. Ковалевский, В.П. Попов. Зарегистрирован 10.04.1995. Приоритет от 01.09.1992.

I.S. Anufriev[1]*, A.P. Papulov*[1,2]*, E.Yu. Shadrin*[1]*, O.V. Sharypov*[1]

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS ,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyeva ave., 1
[2]Novosibirsk State University,
Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2

INVESTIGATION OF INNER AERODYNAMICS OF FOUR-VORTEX FURNACE MODEL

УДК 537.523.5

А.Д. Байтимиров, А.В. Герасимов, А.П. Кирпичников, Ф.Р. Сабирова

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68

О РАЗНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ И АТОМНО-ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУР НА ГРАНИЦЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

В работе рассмотрен принципиальный, один из наиболее интересных вопросов, возникающих в теории и практике двухтемпературного дугового разряда — вопрос о разнице электронной $T_e(R)$ и атомно-ионной (газовой) $T(R)$ температур на границе электрической дуги. Или, говоря другими словами, вопрос о значении скачка температур $T_e(R)$ — $T(R)$ на границе основной зоны теплоотвода при $r = R$, где R — радиус ограничивающей дугу цилиндрической трубы, стенки которой поддерживаются при фиксированной, достаточно низкой температуре $T(R)$.

Для расчетов используется двухтемпературная каналовая модель дугового разряда. Представлено значение разрыва $\Delta T(R)=T_e(R)-T(R)$, рассчитанное для различных значений силы тока в разряде. Расчеты проведены для плазмы аргона при атмосферном давлении для трех значений силы тока $I = 30$, 78 и 200 А и различных значений температуры стенки $T(R)$. Также представлены соответствующие экспериментальные результаты для этих же условий других авторов. Наблюдается хорошее качественное совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными.

К настоящему времени накоплен большой материал о распределении T_e в дуговых плазмотронах, включая значение T_e как функции r на границе (в действительности, конечно же, вблизи границы), стабилизирующей разряд цилиндрической трубы, играющей роль термостата для атомно-ионного газа [1—3]. В настоящей работе эта задача решена в рамках известной каналовой модели М. Штеенбека [4], как наиболее удобной для анализа широкого класса задач о поддержании плазмы газового разряда в электрических и магнитных полях [5, 6].

На основе двухтемпературной каналовой модели дугового разряда построенной в работе [7] выведены формулы зависимостей электронной и газовой температур в непроводящей зоне дугового разряда.

В работе представлены значения разрыва $\Delta T(R)=T_e(R)-T(R)$, рассчитанные для различных значений силы тока в разряде. Расчеты проведены для плазмы аргона при атмосферном давлении для указанных трех значений силы тока и различных значений температуры стенки $T(R)$. Также представлены соответствующие экспериментальные результаты, опубликованные в цикле работ [1—3]. Как видим, наблюдается хорошее качественное

совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными, увеличивающееся при уменьшении температуры стенки.

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы как для простых модельных оценок достаточно сложных физических процессов, так и в ряде инженерных расчетов, в том числе касающихся применения низкотемпературной плазмы дуговых разрядов в процессах нанесения функциональных покрытий.

Литература

1. **Асиновский Э.И., Пахомов Е.П.** //ТВТ. 1968. Т. 6. № 2. С. 333.
2. **Асиновский Э.И., Пахомов Е.П., Ярцев И.М.** Химические реакции в низкотемпературной плазме. М.: ННХС АН СССР, 1977. С. 83.
3. **Асиновский Э.И., Пахомов Е.П., Ярцев И.М.** // ТВТ. 1978. Т. 16. № 1. С. 28.
4. **Фон Энгель А., Штеенбек М.** Физика и техника электрического разряда в газах. М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935. Т. 1.
5. **Райзер Ю.П.** Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980. 416 с.
6. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
7. **Gerasimov A.V., Kirpichnikov A.P.** // Thermal Science. 2003. № 1. P. 101.

A.D. Baytimirov, A.V. Gerasimov, A.P. Kirpichnikov, F.R. Sabirova

Kazan National Research Technological University,
Russia, 420015, Kazan, K. Marks str., 68

THE DIFFERENCE OF THE ELECTRONS AND THE ATOM-IONIC TEMPERATURE AT THE BOUNDARY BETWEEN ARC DISCHARGE

УДК 532.529.5

Г.В. Барткус[1,2]*, *В.В. Кузнецов*[1,2]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

*e-mail: germanbartkus@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ

В последнее время значительное внимание уделяется исследованиям газожидкостных и двухжидкостных течений в микроканалах. Это обусловлено тем, что применение микроканальных систем дает возможность управления процессами переноса при фазовых превращениях и химических реакциях с временным разрешением порядка нескольких миллисекунд. Сейчас начинается активное внедрение таких технологий в высокоинтенсивных системах охлаждения на основе микроканальных теплообменников, в том числе для охлаждения процессоров компьютеров, в химических реакторах и биологических чипах для экспресс-анализа крови. Большие площади поверхности взаимодействующих фаз (уменьшение поперечного размера канала увеличивает отношение поверхности к объему обратно пропорционально диаметру канала) обеспечивают эффективный тепло-массообмен в данных системах.

В данной работе экспериментально изучены локальные характеристики двухфазного газожидкостного течения в прямоугольном микроканале 269×362 μм с Т-образным смесителем на входе. Особенностью данной работы является использование жидкостей с различными физическими свойствами, включая поверхностное натяжение на границе с газообразным азотом и вязкость, что позволило построить обобщенную карту режимов течения в безразмерных координатах. Визуализация режима течения и измерение его характеристик проводились с помощью высокоскоростной видеосъемки камерой Optronis CX600x2 и метода двойного лазерного сканирования [1].

Проведены работы, направленные на изучение влияния свойств жидкости (поверхностное натяжение, вязкость, плотность) и расположения микроканала в пространстве (горизонтальное, вертикальное) на режимы течения и области их существования. В качестве жидкой фазы использовались этанол, дистиллированная вода и 40%-ный водный раствор этанола; в качестве газа — азот. Установлено, что для данного микроканала, отношение длины которого к ширине превышает 700, формируются три основные режима течения: периодическое течение с удлиненными пузырями, переход-

ное течение (непериодическое течение с удлиненными пузырями) и кольцевое течение. На основе визуализации и лазерного сканирования были построены карты режимов течения для всех типов смесей (дистиллированная вода—азот, этанол—азот, 40%-ный водный раствор этанола—азот). Показано незначительное влияние расположения микроканала на границы режимов течения, что говорит о доминировании капиллярных сил. Карты режимов построены в безразмерных координатах комплексов чисел Рейнольдса и Вебера $Re^{0,2}We^{0,4}$, предложенных в статье Waelchli [2]. Безразмерный комплекс позволяет учитывать свойства жидкости и дает хорошее обобщение экспериментальных данных. Определены показатели степени в комплексах чисел Рейнольдса и Вебера, при которых наблюдается наилучшее совмещение границ режимов течения.

Развит метод измерения локальной толщины пленки жидкости в удлиненном пузыре. Измерения толщины пленки жидкости проводились для восходящего течения водно-азотной смеси, используя метод лазерно-индуцированной флуоресценции (μLIF), который имеет высокое пространственное и временное разрешение [3]. Получено, что толщина пленки жидкости на стенках микроканала неравномерная в поперечном сечении канала и уменьшается с увеличением расстояния от вершины пузыря.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (РНФ № 16-19-10519).

Литература

1. **Козулин И.А., Кузнецов В.В.** Экспериментальное изучение структуры газожидкостного течения в прямоугольном мини-канале оптическими методами// Вестник НГУ. Серия: Физика 2015. Т. 10. № 3. С. 63—69.
2. **Waelchli S., Rudolf von Rohr P.** Two-phase flow characteristics in gas-liquid microreactors // Int. Jour. of Multiphase Flow 2006. Vol. 32. P. 791—806.
3. **Барткус Г. В., Кузнецов В.В.** Экспериментальное изучение детальной структуры газожидкостного течения в прямоугольном микроканале // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2016. Т. 11. № 1. С. 73—79.

G.V. Bartkus[1,2]*, V.V. Kuznetsov*[1,2]

[1] Novosibirsk State University,
Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2
[2] Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE LOCAL CHARACTERISTICS OF GAS-LIQUID FLOW IN A RECTANGULAR MICROCHANNEL

УДК 621.019

А.В. Беляев, А.В. Дедов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная, 14

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В МИНИ-КАНАЛАХ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ПРИВЕДЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ

Работа посвящена экспериментальному исследованию гидродинамики и теплообмена в вынужденном потоке кипящей жидкости в канале малого диаметра при высоких приведенных давлениях. Актуальность данных исследований связана с растущим интересом к миниатюрным теплообменным устройствам в различных отраслях промышленности.

В докладе представлено описание экспериментального стенда, а также анализ и обобщение опытных данных по кризису теплообмена. Были выполнены экспериментальные исследования с двумя теплоносителями R113 и RC318 на двух рабочих участках с диаметрами 1,36 и 0,95 мм, длиной 200 и 100 мм соответственно. Гидравлический контур стенда позволяет поддерживать стабильные параметры потока на входе рабочего участка при давлениях до 3 МПа и температурах до 200 ºС.

Всего получено 195 рабочих режимов с разными параметрами потока в диапазоне приведенных давлений $p_r = p/p_{cr} = 0{,}15 \div 0{,}9$, массовых скоростей $\rho w = 770 \div 4800$ кг/(м^2·с) и температур на входе в рабочий участок $T_{вх} = 50 \div 180$ ºС. На каждом режиме с фиксированными параметрами потока подводилась максимально возможная мощность, значение которой определялось или возможностью источника питания, или наступлением кризиса теплообмена при кипении, или когда температура стенки превышала 350 ºС. Таким образом было получено около 190 значений критических тепловых потоков в представленном выше диапазоне параметров теплоносителя.

Развитие и фиксация кризиса теплообмена определялись по показаниям термопары на стенке Т6 на выходе канала. Всего было установлено шесть термопар Т1 – Т6 по длине канала. В зависимости от значений температуры на входе и массовой скорости характер проявления кризиса теплообмена имеет свои особенности. При кризисе недогретой жидкости наблюдалось резкое возрастание показаний термопары Т6 (рис. 1). Дальнейшее увеличение температуры входа и уменьшение массовой скорости приводят к появлению зон с устойчивым пленочным кипением и распространением кризиса против потока (рис. 2).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-08-00806.

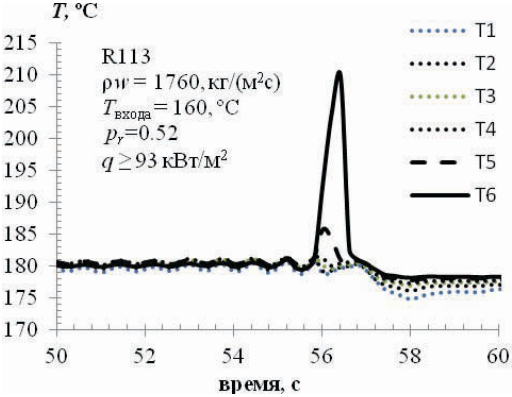


Рис. 1. Показания термопар стенки в момент развития кризиса

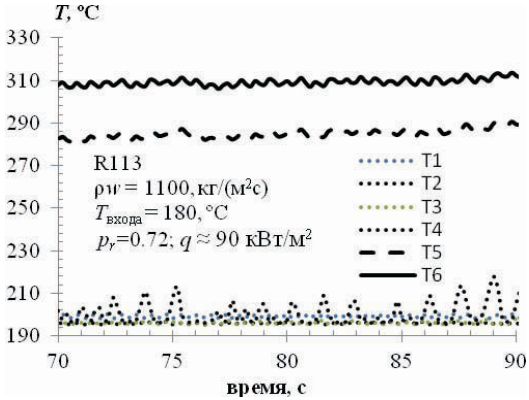


Рис. 2. Показания термопар стенки при пленочном кипении

A.V. Belyaev, A.V. Dedov,

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14

AN EXPERIMENTAL STUDY OF CRITICAL HEAT FLUX DURING FLOW BOILING IN MINICHANNELS AT HIGH REDUCED PRESSURE

УДК 532.546

А.В. Бороздин, А.Т. Комов*

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

*e-mail: OptiO.2012@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ

Атомная энергетика — динамично развивающаяся отрасль энергетики, способная на практическом уровне заменить традиционную тепловую энергетику с ее исчерпаемыми запасами топлива. Одним из путей решения этой проблемы является использование тепловыделяющих сборок с микротвэлами (ТВС МТ), непосредственно охлаждаемых теплоносителем. Конструкция ТВС МТ будет гарантировать новый уровень безопасности на фоне улучшения основных технико-экономических показателей энергетических установок [1—3].

Цель работы — расширить экспериментальную базу данных по гидродинамике и теплообмену в цилиндрической шаровой засыпке, провести сравнение с ранее полученными данными и обосновать перспективность применения шаровой засыпки в атомных реакторах.

Работа является продолжением исследований [4, 5]. Разработан и изготовлен новый рабочий участок, модернизирован гидравлический контур. В качестве шаровой засыпки используются сферы из нержавеющей стали диаметром 2 мм. Индукционный нагрев засыпки осуществлялся с помощью ВЧ-генератора с тепловой мощностью до 12 кВт.

Центральная часть рабочего участка состоит из двух коаксиально расположенных трубок из поликарбоната диаметрами 50 и 32 мм. Внутренняя трубка обеспечивает удержание цилиндрической шаровой засыпки. Наружная трубка обеспечивает прочность и герметичность конструкции. Изготовлены пары таких трубок для различных высот засыпки (75, 100, 125 мм). С торцов засыпка удерживается решетками, выполненными из сваренных между собой шариков. Подвод теплоносителя, центровка труб и решеток осуществляются через детали корпуса, выполненные из стеклотекстолита. В них же предусмотрены отборы давления и герметичные вводы для термопар, измеряющих температуру на входе и выходе из рабочего участка.

Измерение температуры выполнялось с помощью хромель-алюмелевых термопар. Внутри шаровой засыпки в трех сечениях по высоте располагается 9 термопар.

С целью повышения надежности измерения расхода применялись электромагнитный расходомер и ротаметр. Измерения давления в контуре и рабочем участке выполнены стрелочными манометрами и датчиком перепада давления.

В ходе исследований был обработан большой массив экспериментальных данных, получены зависимости гидравлического сопротивления и коэффициента теплоотдачи от числа Re.

Литература

1. **Пономарев—Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Хрулев А.А., Дегальцев Ю.Г.** Перспективы развития микротвэлов в ВВЭР // Атомная энергия. 1999. Т. 86. Вып. 6. С. 443—449.
2. **Филиппов Г.А., Меламед Л.А., Фальковский Л.Н., Тропкина А.И.** Экспериментальное исследование гидродинамики одно- и двухфазных потоков в конструкциях с распределенным сопротивлениями // Вопросы атомной науки и техники. Серия: обеспечение безопасности АЭС. 2009. № 25. С. 15—27.
3. **Быкова С.М., Таиров Э.А.** Влияние параметров засыпки на истечение пароводяной смеси // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 9 (92). С. 197—201.
4. **Экспериментальное** исследование и численное моделирование гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках / А.В. Бороздин, А.Н. Варава, А.В. Дедов и др. // Тепловые процессы в технике. 2015. № 7. С. 295—300.
5. **Бороздин А.В., Сморчкова Ю.В.** Экспериментальное моделирование гидродинамики и теплообмена в шаровой засыпке // Труды Шестой российской национальной конференции по теплообмену. 2014. С. 915—918.

A.V. Borozdin, A.T. Komov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN CYLINDRICAL SPHERICAL FILLING

УДК 532.529

Н.В. Васильев[1,2]*, *К.А. Ходаков*[2]

[1]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

[2]Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская, 13, стр. 2

*e-mail: nikvikvas@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ НЕДОГРЕТОГО ДО ТЕМПЕРАТУРЫ НАСЫЩЕНИЯ ХЛАДОНА NOVEC 649 КАК МЕТОДА ИНТЕНСИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ КЛАСТЕРОВ

Работа выполнена в рамках изучения возможностей совершенствования систем охлаждения компьютерных чипов с помощью внешних, контактирующих с ними охлаждающих устройств (attached cooling systems). Согласно существующей сегодня классификации [1, 2] такие системы принадлежат ко второму поколению (Gen-2) технологий охлаждения компьютерных кластеров. Они рассчитаны на отвод тепловых потоков плотностью до 100 Вт/см^2. При этом важнейшим фактором является непревышение температурой интерфейса предельного значения (~72 ºС).

Представлены результаты экспериментального исследования теплоотдачи, гидравлического сопротивления и предельных параметров работы систем охлаждения с использованием кипения недогретой до температуры насыщения диэлектрической жидкости Novec 649 в условиях вынужденного течения.

Исследование проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Рабочий участок (канал) имел прямоугольное поперечное сечение шириной 6, высотой 3 и длиной 50 мм. Роль теплоотдающей поверх-

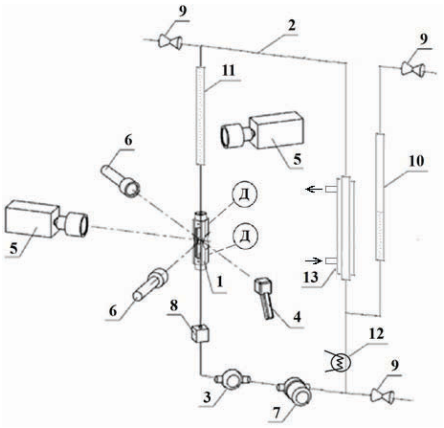


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* — рабочий участок; *2* — замкнутый контур с жидкостью; *3* — расходомер; *4* — тепловизор; *5* — видеокамеры; *6* — подсветка; *7* — циркуляционный насос; *8* — датчик температуры жидкости; *9* — вентили; *10* — демпфирующая емкость; *11* — прозрачная вставка; *12* — электрический подогреватель; *13* — теплообменник-охладитель; Д — датчики давления

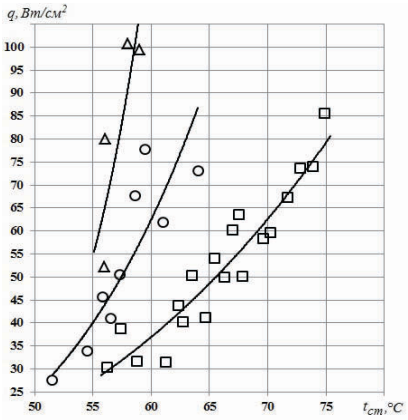


Рис. 2. Зависимость теплового потока на стенке от температуры поверхности нагрева

ности выполняла нихромовая (Х20Н80) пластина длиной между токоподводами 30, шириной 4 и толщинами 0,2 мм.

В результате проведенных экспериментов было получено, что при кипении недогретого до температуры насыщения Novec 649 при скорости охладителя v = 6 м/с и температуре $t_ж$ = 21 ºС можно отвести тепловые потоки до $q \approx 85$ Вт/см^2 при температуре поверхности $t_{ст} < 75$ ºС (рис. 2). При этом величина гидравлического сопротивления участков кипения слабо отличается от таковой для однофазного потока. При v = 7,4 м/с и $t_ж \approx 15$ ºС была достигнута плотность теплового потока q = 100 Вт/см^2. В исследованном диапазоне параметров кипение охладителя Novec 649 не сопровождалось заметным ростом паросодержания потока, что исключает возникновение кризисных явлений в системе охлаждения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-08-00163.

Литература

1. **Bar-Cohen A., Holloway C.A.** Thermal Science and Engineering — from Macro to Nano in 200 Years // Proc. of the 15th Int. Heat Transfer Conf. Kyoto Japan. 2014. IHTC-15-FL01.
2. **Bar-Cohen A.** Thermal Packaging: From Problem Solver to Performance Multiplier // Electronic Cooling Magazine. 2013. Vol. 8. No 4. P. 8—11.

N.V. Vasiliev[1,2]*, K.A. Khodakov*[2]

[1]Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5
[2]Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya str., 13, Bldg. 2

STUDYING OF SUBCOOLED REFRIGERANT NOVEC 649 BOILING AS MEANS OF COOLING OF THERMALLY-INTENSE COMPUTER CLUSTERS

УДК 536.1

А.В. Винцаревич, И.Д. Налётов, А.В. Митяков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ КАК МЕТОД МОНИТОРИНГА ДЛЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Предложено использовать возможности градиентной теплометрии на поверхности камеры сгорания для мониторинга и оптимизации процессов в цилиндре дизельного двигателя. Гетерогенные градиентные датчики теплового потока удается использовать при различных режимах в течение длительного времени. Опережение впрыска топлива задается положением точки максимума на временноїй теплограмме; при этом само значение плотности теплового потока можно не учитывать. Развитие такого подхода может оказаться продуктивным для раздельного мониторинга рабочих процессов в цилиндрах мощных судовых двигателей.

Литература

1. **Сапожников С.З, Митяков Ю.В., Митяков А.В**. Основы градиентной теплометрии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 203 с.
2. **Кавтарадзе Р.З.** Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.

A.V. Vintcarevich, I.D. Naletov, A.V. Mityakov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnichnichrskaya str., 29

GRADIENT HEAT FLUX MEASUREMENT AS MONITORING METHOD FOR THE DIESEL ENGINE

УДК 536.2

И.М. Газизов[1,2]*, *Н.И. Михеев*[1,2]

[1]Казанский научный центр Российской академии наук
420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31
[2]Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева — КАИ,
420111,. г. Казань, К. Маркса, 10
*e-mail: gazizov.ilnur.m@gmail.com

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ

Введение. Основная методика имеющихся способов экспериментального определения коэффициента теплоотдачи базируется на измерении осредненных по участку значений [1]. Между тем в отрывных потоках с выступами очень важно иметь данные локальных коэффициентов теплоотдачи [2].

Описание устройства и эксперимента. Теплообменная стенка представляла собой пластину (печатную плату) из стеклотекстолита длиной 450 мм и толщиной 1,6 мм. Медный слой на поверхности печатной платы был вытравлен в виде единой дорожки. Эта дорожка функционально была поделена на 33 участка, которые занимали участки на плате длиной 13 мм и шириной 100 мм. На каждом участке были установлены токовводы. Таким образом, медное покрытие платы (теплообменной стенки) представляло собой 33 термометра сопротивления, которые измеряли локальные значения температуры стенки во время проведения опытов с шагом 13,6 мм по длине канала. На двух дорожках пластины закреплены выступы из алюминия высотой и шириной по 13,6 мм (рис. 1).

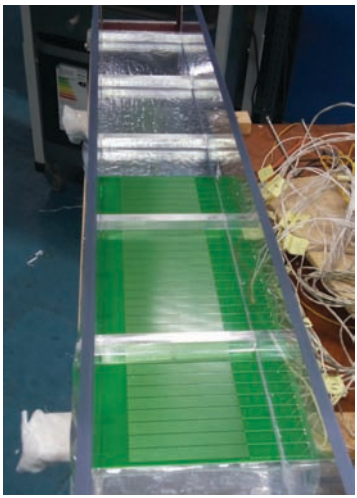


Рис. 1. Измерительная плата с выступами

Эксперименты по теплообмену были организованы следующим образом. На предварительном этапе стенки рабочего участка длительно (~10 мин) прогревались потоком горячего воздуха до достижения стационарной температуры, близкой к температуре горячего потока. Достигался равномерный прогрев стенок рабочего участка. После завершения нагрева в экспериментах выполнялось измерение динамики температурного поля стенки в процессе охлаждения потоком в течение оп-

ределенного времени (~100 с). На основе этой информации на регулярном режиме охлаждения стенки определялось распределение коэффициента теплоотдачи по длине канала.

Подача воздуха в рабочий участок из окружающей среды обеспечивалась вентилятором, работающим на отсос. Расход воздуха измерялся с относительной погрешностью не более 1 % ультразвуковым расходомером ИРВИС-РС4-Ультра, установленным за ресивером. Сбор и запись на персональный компьютер всех параметров в форме напряжений постоянного тока проводились с помощью двух блоков АЦП L-CARD E-14-140-M с 16 дифференциальными каналами каждый.

Способ расчета. Для измерения коэффициента теплоотдачи используется метод регулярного режима, в основе которого лежит равенство изменения энтальпии нагретой стенки и теплоты, рассеиваемой посредством теплоотдачи. Ввиду того, что на некторых каналах пластины расположены выступы, при расчете локальных коэффициентов теплоотдачи приходится учитывать перетоки тепла и наличие выступа:

$$(V\rho c + V_1\rho_{al}c_{al})\frac{d\theta}{d\tau} + Q_{left} - Q_{right} = -\theta F\alpha.$$

Для участков без выступа в формуле необходимо опустить соответствующие параметры. Получаемое при этом распределение коэффициента теплоотдачи показывает интенсификацию тепла на различных (локальных) участках платы.

Литература

1. **Малюков А.В., Михеев Н.И., Молочников В.М.** Новая методика измерения коэффициента теплоотдачи в лабораторных условиях // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 1. С. 145—148.
2. **Давлетшин И.А., Михеев Н.И.** Структура течения и теплообмен при отрыве пульсирующего потока // ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 442—449.

I.M. Gazizov [1,2], *N.I. Mikheev* [1,2]

[1] Kazan Scientific Center of RAS,
Russia, 420111, Kazan, Lobachevskiy str., 2/31

[2] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI,
Russia, 420111, Kazan, K. Marks str., 10

METHOD AND DEVICE FOR MEASURING THE DISTRIBUTION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT

УДК 621.432.263.5

А.В. Гимбицкий, А.Г. Каримова, С.Г. Дезидерьев

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева — КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СОЗДАНИИ ВОЗДУШНОЙ ЗАВЕСЫ ПОРИСТЫМ ВДУВОМ

Целью настоящего экспериментального исследования является определение теплоотдачи и эффективности тепловой защиты с созданием воздушной завесы вдувом воздуха через пористый экран.

На созданной экспериментальной модельной установке проведены опыты по исследованию процессов теплопередачи в системе (горячая стенка, экран, оболочка) при создании завесы через пористый экран.

Результаты опытов обрабатывались в соответствии с законами термогазодинамики и теплообмена, рассчитывались погрешности измерения. Для каждого режима получены распределения температур как в воздушных прослойках, так и на поверхностях экрана и оболочки [1].

По уравнениям теплового баланса определялись тепловые потоки, по которым рассчитывались коэффициенты теплоотдачи [2].

На рис. 1 показаны результаты в виде зависимости $\mathrm{Nu}_{\mathrm{ср}} = f(\mathrm{Re})_{\mathrm{ср}}$. Наблюдается расслоение экспериментальных точек из-за влияния температуры горячей стенки и величины зазора δ_{Γ}. Для всех рисунков приняты следующие обозначения: □ — $\overline{T}_{\Gamma} = 2{,}0$; ○ — $\overline{T}_{\Gamma} = 2{,}3$; Δ — $\overline{T}_{\Gamma} = 2{,}43$; ∇ — $\overline{T}_{\Gamma} = 2{,}73$; ● — $\overline{\delta}_{\Gamma} = 0{,}75$; ○ — $\overline{\delta}_{\Gamma} = 0{,}56$; ◒ — $\overline{\delta}_{\Gamma} = 0{,}4$; ◔ — $\overline{\delta}_{\Gamma} = 0{,}2$.

Эти результаты в обобщенном виде без учета влияния температурного фактора и геометрических параметров представлены на рис. 2.

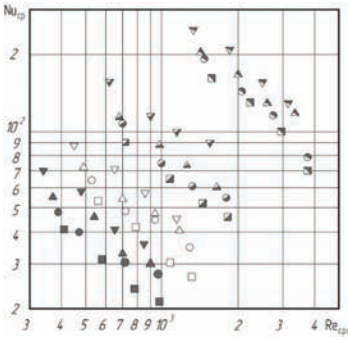


Рис. 1. Зависимость средних чисел Нуссельта от средних чисел Рейнольдса для всех исследованных режимов

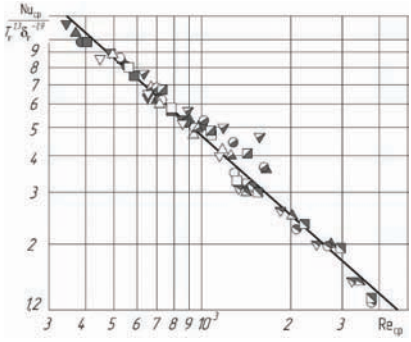


Рис. 2. Обобщенные результаты опытов по теплоотдаче к пористому экрану

Обобщение результатов опытов приводит к зависимости

$$\mathrm{Nu}_{\mathrm{ср}} = 2{,}3 \cdot 10^3 \, \mathrm{Re}_{\mathrm{ср}}^{-0{,}9} \, \overline{T}_{\mathrm{г}}^{1{,}3} \overline{\delta}_{\mathrm{г}}^{-1{,}9} . \qquad (1)$$

Получены зависимости для расчета эффективности и температуры экрана:

$$\theta_{\mathrm{э}} = 0{,}62 \, \mathrm{Re}_{\mathrm{ср.г}}^{0{,}1} \, \overline{T}_{\mathrm{г}}^{\,-0{,}22} \overline{\delta}_{\mathrm{г}}^{\,0{,}2} ; \qquad (2)$$

$$T_{\mathrm{э}} = T_{\mathrm{г}} - 0{,}62 \, \mathrm{Re}_{\mathrm{ср.г}}^{0{,}1} \, \overline{T}_{\mathrm{г}}^{\,-0{,}22} \overline{\delta}_{\mathrm{г}}^{\,0{,}2} \left(T_{\mathrm{г}} - T_{\mathrm{в.вх}} \right) . \qquad (3)$$

Эффективность тепловой защиты наружной оболочки представлена на рис. 3. Видно, что как температурный фактор, так и толщина прослойки в холодной зоне практически не влияют на эффективность тепловой защиты оболочки, изменение расхода воздуха оказывает незначительное влияние.

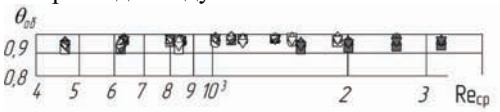


Рис. 3. Результаты опытов по эффективности тепловой защиты наружной оболочки

Результаты, представленные на рис. 3, обобщаются зависимостями

$$\theta_{\mathrm{об}} = 0{,}87 \, \mathrm{Re}_{\mathrm{ср.х}}^{0{,}01} ; \qquad (4)$$

$$T_{\mathrm{об}} = T_{\mathrm{г}} - 0{,}87 \cdot \mathrm{Re}_{\mathrm{ср.х}}^{0{,}01} \left(T_{\mathrm{г}} - T_{\mathrm{окр}} \right) . \qquad (5)$$

Из рис. 3 видно, что эффективность тепловой защиты в случае наружной оболочки на всем диапазоне расхода выше 0,9.

Литература

1. **Гимбицкий А.В., Дезидерьев С.Г., Каримова А.Г.** Влияние способа тепловой защиты на температурное состояние экрана и оболочки // Изв. Вузов. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 62—66.
2. **Расчет** эффективности различных схем тепловой защиты с использованием сплошных и проницаемых экранов / А.Г. Каримова и др. // Тезисы докладов XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену. 2012. Т. 1. Ч. 1. С. 113—117.

A.V. Gimbitskii, A.G. Karimova, S.G. Dezider'ev

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, Russia, 420111, Kazan, K. Marks str., 10

THE EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER WITH THE CREATION OF AIR CURTAIN TROUGH POROUS SURFACE

УДК 532.517.6, 532.574.7

А.Е. Гольцман, Н.И. Михеев, И.И. Саушин

Казанский научный центр Российской академии наук,
420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31

e-mail: an116ya@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПУЛЬСИРУЮЩИХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ SIV

Исследованию периодических пульсирующих течений посвящено большое количество работ, подробный обзор которых выполнен в работе [1]. Основополагающие выводы по динамике пульсирующего течения в турбулентном пограничном слое для широкого диапазона частотно-гармонических характеристик наложенной нестационарности были получены в 80—90-х годах с помощью точечных методов измерения [2, 3 и др.]. Подробное исследование пространственной динамики характеристик активно началось лишь с появлением полевых методов измерения и развития вычислительной техники, применяемой для прямого численного моделирования.

Наиболее известный из полевых оптических методов — PIV, который начал применяться для исследования пульсирующих течений практически одновременно с исследованием стационарных. В обзорной статье [4], посвященной экспериментальным методам исследования пульсирующих потоков, отмечено, что для нестационарных течений полевой метод PIV, несмотря на ряд преимуществ, уступает точечным по величине погрешности.

На сегодняшний день опубликовано несколько десятков работ, посвященных исследованию пульсирующих течений с помощью полевого метода PIV и его аналогов, но лишь несколько из них посвящены исследованию динамики характеристик в пограничном слое. В работе [5] метод PIV применялся для измерения амплитуды и фазы скорости в осциллирующем ламинарном пограничном слое. Полевой оптический метод PIV применялся для исследования переходного режима пульсирующих потоков [6].

Оптический полевой метод измерения мгновенной скорости SIV (Smoke Image Velocimetry) [7] наравне с PIV позволяет получать достоверные профили скорости турбулентных пульсаций и завихренности векторного поля в турбулентном пограничном слое. Применение метода SIV позволяет исследовать пространственно-временную структуру турбулентности в пульсирующих потоках с пространственным масштабом измерения, достаточным для анализа мелкомасштабных характеристик турбулентности. Данное преимущество метода SIV перед другими оптическими методами позволяет проанализировать и выявить возможные дополнительные особенности режимов пульсирующего течения, вызванные динамикой мелкомасштабных

характеристик, описываемых с помощью тензора градиентов напряжений Рейнольдса. Данная информация является полезной для корректировки существующих URANS моделей турбулентности путем изменения коэффициентов членов, входящих в уравнение баланса турбулентной энергии.

В данной работе представлено экспериментальное исследование турбулентного пограничного слоя пульсирующих течений в широком диапазоне параметров потока, выполненное с помощью цифрового полевого оптического метода измерения мгновенной скорости SIV [7, 8].

Литература

1. **Carpinlioglu M.O. and Gundogdu M.Y.** A critical review on pulsatile pipe flow studies directing towards future research topics // Flow Meas. Instrum. 12 (3), 163 (2001).
2. **Tardu F.S., Maestri R.**Wall shear stress modulation in a turbulent flow subjected to imposed unsteadiness with adverse pressure gradient // Fluid. 2010. Dyn. Res. 42 (3).
3. **He S., Jackson J.D.** An experimental study of pulsating turbulent flow in a pipe // Eur. J. Mech. B-Fluids. 2009. 28 (2). 309–320.
4. **Nabavi M., Siddiqui K.** A critical review on advanced velocity measurement techniques in pulsating flows // Meas. Sci. Technol. 2010. 21. 042002 (19 p).
5. **Castrej´on-Pita J.R., Castrej´on-Pita A.A., Huelsz G. and Tovar R.** Experimental demonstration of the Rayleigh acoustic viscous boundary layer theory // Phys. 2006. Rev. E 73 036601.
6. **An experimental** study of transitional pulsatile pipe flow / R. Trip, D.J. Kuik, J. Westerweel and C. Poelma // Physics of Fluids. 2012. 24. 014103. dx.doi.org/10.1063/1.3673611.
7. **Mikheev N.I. and Dushin N.S.** A Method for Measuring the Dynamics of Velocity Vector Fields in a Turbulent Flow Using Smoke Image-Visualization Vide // Instruments and Experimental Techniques. 2016. Vol. 59. No. 6. P. 880—887.
8. **Зарипов Д.И., Аслаев А.К., Михеев Н.И., Душин Н.С.** Оценка точности нового оптического метода измерения мгновенных полей скорости потока // Труды Академэнерго. 2016. № 1. С. 42—52.

A.E. Goltsman, N.I. Mikheev, I.I. Saushin

Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences,
Russia, 420111, Kazan, Lobachevskiy str., 2/31

RESEARCH OF TURBULENT BOUNDARY LAYER AT PULSATILE FLOW REGIMES BY OPTICAL METHOD SIV

УДК 532.517.3

Н.В. Горинович[1,2], *А.А. Шумейко*[1]*

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
*e-mail: wordpass.ru@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ КРУГЛОЙ СТРУИ ВОЗДУХА ПРИ НИЗКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Современное развитие МЭМС-технологий (Микроэлектромеханические системы) стимулировало изучение микрогидродинамики пристенных и струйных течений. Как правило, режим течения в микроустройствах ламинарный или переходный, что и стимулировало возрождение интереса к течениям при низких числах Рейнольдса. Применительно к струйным течениям такие работы проводятся в ИТПМ СО РАН, ОИВТ РАН, ИТ СО РАН. В настоящей работе представлено экспериментальное изучение гидродинамики круглой свободной струи воздуха при низких числах Рейнольдса.

Эксперименты проведены с использованием PIV-метода (Particle Image Velocimetry), термоанемометрии и визуализации течения. Рабочий газ — воздух, термодинамические параметры близки к атмосферному давлению и комнатной температуре. Струя создавалась с помощью осесимметричного канала внутренним диаметром d = 3,2 мм и длиной 100 d и вытекала в затопленное воздушное пространство (проточная камера из оргстекла размером 150×150×400 мм). Число Рейнольдса струи, определенное по среднерасходной скорости, диаметру канала и кинематической вязкости, составляло $\mathrm{Re} = Ud/\nu = 200 \div 13\,000$. На первом этапе проводилась визуализация течения в струе, затем измерялись профили продольной и поперечной составляющих средней скорости, продольные и поперечные пульсации скорости, касательные напряжения Рейнольдса.

Известно, что струи неустойчивы при малых числах Рейнольдса $\mathrm{Re} = 10—30$ [1], однако переход к турбулентности происходит при существенно больших значениях чисел $\mathrm{Re} = 600—2000$ [2, 3]. В основном изучены газовые струи, истекающие из профилированных сопел и при больших числах Рейнольдса $\mathrm{Re} > 10^4$. Известно, что начальные условия существенно влияют на динамику развития течения в струе. По разному сценарию происходит и ламинарно-турбулентный переход. В струе, истекающей из сопла, начальный профиль скорости «ударный» с тонкими пограничными слоями. Переход к турбулентности осуществляется в слоях смешения.

В работе изучалась струя, вытекающая из трубки. Распределение продольных пульсаций скорости вдоль оси струи представлено на рис. 1. Как

видно из рисунка, при малых Re = 400 пульсации растут вниз по потоку незначительно. При Re = 2140 наблюдается участок экспоненциального роста пульсаций (зона перехода) и затем участок снижения турбулентных флуктуаций. При Re > 2200, когда происходит ламинарно-турбулентный переход в трубе, точка перехода смещается к трубке, характер же затухания турбулентности вниз по потоку сохраняется.

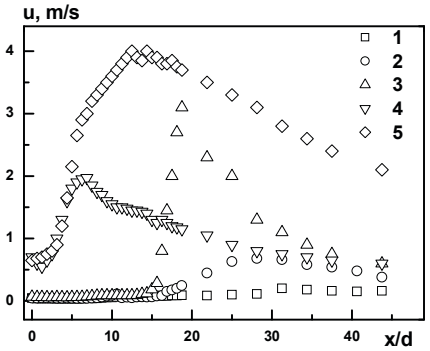


Рис. 1. Пульсации скорости на оси струи: *1* — Re = 400, *2* — 640; *3* — 2140; *4* — 3430, 5 — 12900

В работе показано, что профили скорости на ламинарном участке соответствуют расчету Шлихтинга, а в зоне турбулентного течения — зависимости Толмина. Новые результаты получены для зоны ламинарно-турбулентного перехода по продольным и поперечным пульсациям скорости, касательным напряжения Рейнольдса.

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ (грант ОНГ № 14-19-00402п) и РФФИ (грант № 17-08-00958).

Литература

1. **Турбулентное** смешение газовых струй / под ред. Г.Н. Абрамовича. М.: Наука, 1974. 272 с.
2. **Леманов В.В., Терехов В.И., Шаров К.А., Шумейко А.А.** Экспериментальное исследование затопленных струй при низких числах Рейнольдса // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 9. С. 34—40.
3. **Экспериментальное** исследование течения дозвуковых плоских мини- и микроструй воздуха / В.М. Анискин, В.В. Леманов, Н.А. Маслов и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 1. С. 94—101.

N.V. Gorinovich[1,2]*, A.A. Shumeyko*[1]

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1
[2]Novosibirsk State Technical University
Russia, 630073, Novosibirsk, K. Marks ave., 20

INVESTIGATION OF THE ROUND AIR JET AT LOW REYNOLDS NUMBERS

УДК 536.24

В.Я. Губарев, А.Г. Арзамасцев, А.Г. Ярцев*

Липецкий государственный технический университет,
398600, г. Липецк, ул. Московская, 30

*e-mail: gv_lipetsk@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕБЕР-ТУРБУЛИЗАТОРОВ

В настоящее время большинство рабочих лопаток имеет схему охлаждения с ребрами-турбулизаторами малой высоты. В таких каналах интенсификация теплообмена происходит за счет постоянного разрушения пограничного слоя и дополнительной турбулизации потока охладителя у теплообменной поверхности [1]. В данной работе исследовано влияние высоты ребер-турбулизаторов и расстояния между ними на средний по длине и максимальный локальный коэффициенты теплоотдачи и величину потерь давления в канале, схема которого приведена на рис. 1.

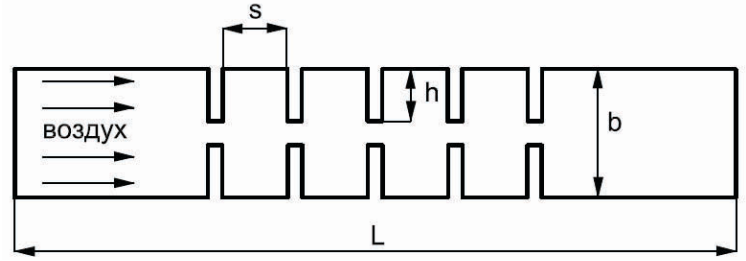


Рис. 1. Схема канала с ребрами-турбулизаторами

Исследование проводилось в программном комплексе ANSYS для следующих геометрических характеристик: ширина канала b = 10 мм, длина канала L = 200 мм, высота ребра h варьируется от 1 до 4 мм, расстояние между ребрами s изменяется от 1 до 30 мм. Ширина ребра принималась равной 1 мм. Параметры воздуха на входе: температура 20 °С, скорость задавалась от 30 до 50 м/с. Температура стенок канала принята постоянной и равна 100 °С.

Распределение среднего по длине канала коэффициента теплоотдачи для ребра высотой 1 мм от расстояния между сопротивлениями и скорости воздуха представлено на рис. 2.

При расстоянии между ребрами 5 мм для скорости воздуха 30 м/с среднее по длине значение коэффициента теплоотдачи превышает установившееся значение, посчитанное по известному критериальному уравнению [2], на 18,7 %, максимальное значение локального коэффициента теплоотдачи равно 252,5 Вт/(м^2·К), потери давления по сравнению с каналом без ребер-

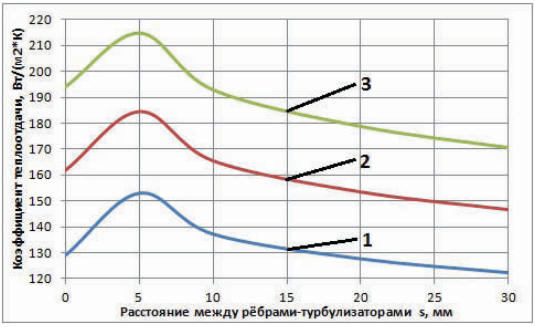


Рис. 2. Распределение среднего по длине канала коэффициента теплоотдачи с ребрами высотой 1 мм: *1* — скорость 30 м/с; *2* — скорость 40 м/с; *3* — скорость 50 м/с

турбулизаторов увеличились на 142,7 %; для скорости 40 м/с получено увеличение среднего коэффициента теплоотдачи 14 %, максимальное значение локального коэффициента теплоотдачи составляет 310,9 Вт/(м^2·К), рост потерь давления — 153,3 %; для скорости 50 м/с средний коэффициент теплоотдачи увеличился на 10,6 %, максимальное значение локального коэффициента теплоотдачи — 365,6 Вт/(м^2·К), увеличение потерь давления — 161,9 %.

Литература

1. **Халатов А.А., Романов В.В., Дашевский Ю.А., Письменный Д.Н.** Тенденции развития систем охлаждения лопаток высокотемпературных энергетических ГТД. Часть 1. Современное состояние // Промышленная теплотехника. 2010. Т. 32. № 1. С. 53—61.
2. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. М.: Энергоатомиздат, 1981. 440 с.

V.Y. Gubarev, A.G. Arzamastcev, A.G. Yartsev

Lipetsk State Technical University,
Russia, 398600, Lipetsk, Moskovskaya str., 30

RESEARCH OF HEAT EXCHANGE INTENSIFICATION IN CHANNELS WHEN USING RIB-TURBULATORS

УДК 632.29

*П.Б. Дермер**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5

*e-mail: dermer@bmstu.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ГЕНЕРАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОГНЕННЫХ ВИХРЕЙ

Огненные смерчи наряду с воздушными смерчами являются примерами экологических катастроф, наносящими колоссальный ущерб окружающей среде и приводящими к многочисленным разрушениям и жертвам. Огненные вихри – вертикально ориентированные вращающиеся огненные факелы, драматически увеличивающие опасность природных и техногенных пожаров и их последствия. Огненные смерчи — довольно редкие природные явления, возникающие при крупных лесных пожарах, массовых пожарах в городах и авариях на крупных пожароопасных объектах нефтехимии, лесоперерабатывающей промышленности и др. Последствиями атомной бомбардировки Хиросимы и массированных бомбежек Гамбурга и Дрездена военно-воздушными силами США во время второй мировой войны стали исключительно опасные продолжительные неуправляемые пожары. После множественных одновременных возгораний в условиях города, плотно насыщенного горючими материалами, пламена сливались, образуя достаточно однородно горящую площадь, вследствие чего возникали огненные смерчи.

Вихревые (закрученные) течения используются для стабилизации процессов сжигания плохо горящих материалов (низкосортных углей, топлива растительного происхождения и т.п.). Известными техническими устройствами, в которых организуют закрутку потока, являются вихревые горелки и циклонные камеры сгорания. Наличие рециркуляционных зон обеспечивает интенсивное перемешивание и стабилизацию пламени, а также многократный рост времени нахождения топливо-воздушной смеси в зоне горения, что ведет к значительному увеличению полноты сгорания. Отметим, что генерация огненных концентрированных (компактные области горения с высокими значениями завихренности) вихрей возможна над поверхностью жидких или твердых горючих материалов при их сжигании.

Настоящая работа является продолжением исследования [1], в котором была продемонстрирована возможность генерации свободных концентрированных огненных вихрей в лабораторных условиях без использования принудительной закрутки.

Приводятся результаты экспериментального исследования свободных нестационарных огненных вихрей. Генерация вихревых структур происходила при горении таблеток уротропина (гексаметилентетрамина), располагаемых на подстилающей поверхности (лист алюминия). В отличие от

большинства предыдущих исследований (см., например, [2, 3]) в экспериментах не использовались механические закручивающие устройства и боковой воздушный поток для получения огненных вихревых структур. Предположено, что генерация огненных вихрей происходила вследствие неустойчивости процесса горения. В результате экспериментов получены данные по условиям генерации (количество таблеток, время начала генерации, мощность тепловыделения) огненных вихрей и их интегральным параметрам (время жизни, высота, диаметр).

Генерируемые огненные вихревые структуры являются лабораторными аналогами огненных вихрей и смерчей, часто возникающих при лесных пожарах и возгораниях на больших площадях в городских районах при плотной застройке, а также на лесоперерабатывающих предприятиях.

Работа выполнена при поддержке Программы президиума РАН I.31П «Фундаментальные исследования процессов горения и взрыва» (координатор – академик РАН В.А. Левин).

Литература

1. **Дермер П.Б., Вараксин А.Ю.** Физическое моделирование нестационарных огненных вихрей при горении таблеток твердого топлива // Безопасность в техносфере. 2016. № 3. С. 65—70.
2. **Lei J., Liu N., Zhang L., Satoh K.** Temperature, velocity and air entrainment of fire whirl plume: a comprehensive experimental investigation // Combust. Flame. 2015. V. 162. P. 745—758.
3. **Lei J., Liu N., Satoh K.** Buoyant pool fires under imposed circulations before the formation of fire whirls // Proc. Combust. Inst. 2015. V. 35. P. 2503—2510.

P.B. Dermer

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CONDITIONS OF NON-STATIONARY FIRE WHIRLS GENERATION

УДК 532.574.7

*Н.С. Душин**

Казанский научный центр Российской академии наук,
420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31

*e-mail: ndushin@bk.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА SIV ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ОБРАТНОГО УСТУПА

В настоящее время для измерений характеристик потока с различной степенью распространения [1] используют оптические (PIV, PTV, LDA) и термоанемометрические методы. Все они имеют свои особенности и связанные с ними области применения. Полевые методы позволяют измерять мгновенные пространственные распределения компонент актуальных значений скорости. Термоанемометры обладают высоким пространственным и временным разрешением, но измерения носят локальный характер. Объединить достоинства полевых и термоанемометрических методов на сегодняшний день достаточно сложно, но одна из ветвей развития PIV идет по пути увеличения временного разрешения метода (HR PIV).

Несколько лет назад в системах HR PIV начали использовать высокочастотные лазеры большой мощности [2]. В последнее время предпринимаются попытки применения высокоскоростных видеокамер в сочетании с лазерами постоянного действия [3]. Такой подход в пределе позволяет получать последовательные поля скорости с интервалом времени, равным времени экспозиции скоростных видеокамер. В то же время в методе PIV имеется фактор, сдерживающий реализацию максимальных характеристик упомянутого подхода. Это низкая отражающая способность отдельных трассеров. Поэтому дальнейшее улучшение HR PIV главным образом связано с увеличением светочувствительности матриц видеокамер.

В работе [4] авторами было предложено использовать для полевых оптических измерений скоростную видеосъемку дымовой визуализации потока (метод SIV), что существенно повышает отражающую способность выделяемой световым ножом части течения и, следовательно, видеосъемку можно выполнять с меньшим временем экспозиции. Кроме использования в качестве первичных экспериментальных данных дымовых картин, метод SIV имеет такие отличительные особенности, как определение смещения фрагментов изображений с точностью до пикселя не по пологому максимуму кросскорреляционной функции, а по острому минимуму функционала; подпиксельная интерполяция выполняется поверхностью второго порядка; метод имеет меньшую погрешность (по сравнению с PIV) при больших смещениях фрагментов, концентрациях и изображениях диаметров частиц.

В данной работе оценивается возможность применения метода SIV для измерений параметров потока при обтекании обратного уступа, что является одним из основных тестов для методов измерений и расчета турбулентных течений. Оценка осуществлялась по результатам сравнения данных SIV-измерений с LDV-измерениями [5] и результатам прямого численного моделирования [6]. Сопоставлялись профили средней скорости потока (в диапазоне y^+ от 2 до 670) и профили корреляций пульсаций скорости для типичных зон турбулентного отрывного течения.

Полученные результаты SIV-измерений показали хорошее согласование с DNS и LDV-измерениями. Это позволяет сделать вывод, что метод SIV можно применять для исследования течений с большим градиентом скорости, наличием возвратного течения и широким диапазоном размеров вихревых структур.

Литература

1. **Westerweel J., Elsinga G., Adrian R.** Particle Image Velocimetry for Complex and turbulent Flows // Annual Review of Fluid Mechanics. 2013. Vol. 45. P. 409—436.
2. **Boiko A., Dovgal A., Hein S., Henning A.** Particle image velocimetry of a low-Reynolds-number separation bubble // Exp. Fluids. 2010. DOI: 10.1007/s00348-010-0887-z (published online).
3. **Christian E. Willert.** High-speed particle image velocimetry for the efficient measurement of turbulence statistics // Exp. Fluids (2015) 56:17.
4. **Mikheev N.I. and Dushin N.S.** A Method for Measuring the Dynamics of Velocity Vector Fields in a Turbulent Flow Using Smoke Image-Visualization Videos // Instruments and Experimental Techniques. 2016. Vol. 59. No. 6. P. 880—887.
5. **Jovic, S., Driver, D.M.** Backward-facing step measurement at low Reynolds number, Re_h = 5000 // NASA Tech. Mem.108807. 1994.
6. **Le H., Moin P., and Kim J.** Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step // Journal of Fluid Mechanics 330 (1997). 349—374.

N.S. Dushin

Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences,
Russia, 420111, Kazan, Lobachevskiy str., 2/31

APPLICATION OF SIV METHOD FOR MEASUREMENT OF TURBULENT VELOCITY PULSATIONS IN BACKWARD-FACING STEP FLOW

УДК 621.521

О.А. Евдокимов, С.В. Веретенников, А.А. Емец

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВОГО ПРЯМОТОЧНОГО ЭЖЕКТОРА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВАКУУМИРОВАНИЯ И ОЧИСТКИ ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК ГТД

В процессе эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей возникает ряд проблем, связанных с ухудшением качества распыла топлива форсунками вследствие их закоксования. В настоящее время очистка топливных форсунок от нагара выполняется механическим путем, заключающемся в их демонтаже при снятии двигателя с самолета, что является достаточно затратным и неэффективным.

Гидравлические исследования по очистке топливных двухконтурных форсунок двигателей Д-30КУ/КП/КУ-154, проведенные ранее ПАО «НПО «Сатурн», показали, что перспективной является организация подачи промывочной жидкости через коллектор первого контура и ее откачка через коллектор второго контура. Это, с одной стороны, позволяет осуществить промывку форсунок непосредственно «на крыле», не прибегая к необходимости их демонтажа. С другой стороны, требует проработки и реализации гидравлической циркуляционной схемы, обеспечивающей требуемые перепады давления в контурах форсуночного коллектора.

Решение приведенной задачи возможно в случае обеспечения необходимого перепада давления за счет создания области разрежения на входе во второй контур коллектора форсунок. Откачка загрязненной жидкости по отмеченной схеме, как правило, дополнительно сопровождается засасыванием воздушных масс и требует реализации процессов сепарации и фильтрации с целью организации ее повторного использования.

Исследования многих авторов показывают, что добиться высоких значений степени разрежения, в том числе и при движении многофазных потоков, возможно за счет использования эжекторных устройств [1—3]. Отмеченный класс устройств эффективно зарекомендовал себя в тех отраслях промышленности, энергетики и строительства, где требуется обеспечение условий «глубокого» вакуума, а также организация процессов сепарации и смешения.

Экспериментальные исследования по вакуумированию второго контура топливного коллектора позволили обеспечить значение доли возвращаемой в систему жидкости до 99 % (рис. 1). Проведенные испытания по промывке топливных форсунок как в индивидуальной постановке, так и в составе коллектора, продемонстрировали высокое качество очистки наружных поверхностей распылителей от лакового и сажистого нагара (рис. 2).



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Визуализация вакуумирования сопла форсунки при $p_ж = 0{,}55 \cdot 10^5$ Па: *а* — $p_{вак} = 0{,}95 \cdot 10^5$ Па; *б* — $p_{вак} = 0{,}9 \cdot 10^5$ Па; *в* — $p_{вак} = 0{,}8 \cdot 10^5$ Па

Отработка различных режимов процедуры промывки по расходу и давлению жидкости, давлению разряжения с проведением контрольных проливок на керосине позволили сделать вывод, что соответствие требованиям эксплуатации форсунок достигается при обеспечении времени промывки не менее 90 мин. Это сопряжено с необходимостью организации длительного размягчения и удаления нагара с поверхностей каналов первого и второго контуров, фильтров и распылителей.



а) *б*)

Рис. 2. Фотографии топливной форсунки: *а* — до очистки; *б* — после очистки

Литература

1. **Бирюк В.В., Веретенников С.В., Гурьянов А.И., Пиралишвили Ш.А.** Вихревой эффект. Технические приложения. Т. 2. Ч. 2. М.: Научтехлитиздат, 2014. 288 с.
2. **Суслов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В.** Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
3. **Пиралишвили Ш.А.** Расчетно-экспериментальное исследование смесеобразования в вихревом смесителе // Авиационная техника. 2012. № 2. С. 47—50.

O.A. Yevdokimov, S.V. Veretennikov, A.A. Emets

Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia, 152934, Rybinsk, Pushkin str., 53

APPLICATION OF VORTEX FLOW EJECTOR FOR VACUUMING AND CLEANING GTE FUEL NOZZLES OF METAL HYDRIDES

УДК 621.039.533.6

А.Н. Казаков[1]*, *И.А. Романов*[1], *К.В. Куслин*[2]

[1]Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, ул. Красноказарменная, 17А
[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14
*e-mail: h2lab@mail.ru

ПРИМЕНИМОСТЬ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА К ИЗМЕРЕНИЯМ PCT-СВОЙСТВ МЕТАЛЛОГИДРИДОВ

Введение.

Эксплуатация металлогидридных систем хранения водорода требует исследования PCT-свойств интерметаллических соединений (ИМС) различного масштаба. В реальных системах (≥1 кг металлогидридного порошка) существенно влияние масштабного эффекта на водородпоглощающие свойства материалов [1]. В работе представлены исследования PCT-свойств ИМС статическим и динамическим методами

Экспериментальная часть. Измерения сорбции/десорбции (рис. 1 и 2) водорода ИМС $La_{0.9}Ce_{0.1}Ni_5$ проводились статическим и динамическим методами при температуре 60 °С на установке УС-150. Масса исследуемого образца составляла 500,1 г. В статичном методе измерения каждой точки на PCT-диаграммы проводились до достижения полного равновесия, в динамичном методе время измерения одной точки составляло 10 мин.

Результаты и обсуждение. По PCT-изотермам статичного метода построен график Ван-Гоффа и рассчитаны термодинамические параметры десорбции металлогидрида $La_{0.9}Ce_{0.1}Ni_5$: ΔH^{des} = (30,7 ± 0,2) кДж/моль; ΔS^{des} = (110 ± 2) Дж/(моль·К).

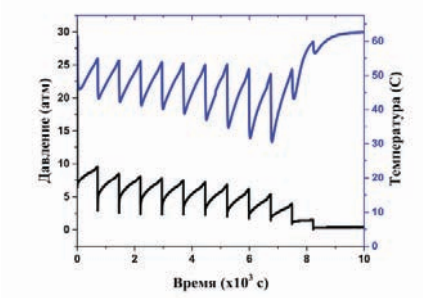


Рис. 1. Зависимости $P(t)$ и $T(t)$ при неравновесной десорбции

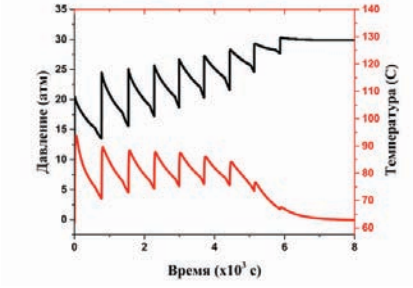


Рис. 2. Зависимости $P(t)$ и $T(t)$ при неравновесной сорбции

Короткое время измерения в неравновесных процессах сорбции/десорбции приводит к стремительному повышению/падению температуры металлогидридной засыпки. Таким образом, давление сорбции/ десорбции не соответствует равновесному при температуре 60 ºС. Интенсивность теплопереноса между засыпкой и теплоносителем (горячей водой) является определяющей. Скорость сорбции/десорбции выше скорости теплопереноса и в результате образуется избыток/дефицит тепла, необходимого для поддержания равновесного давления.

На построенных PCT-изотермах значения давлений сорбции/десорбции при динамическом методе в значительной степени выше/ниже равновесных давлений соответственно. Давление сорбции водорода увеличиваются с 12,2 до 18,8 атм, давление десорбции снижается с 10,0 до 7,5 атм.

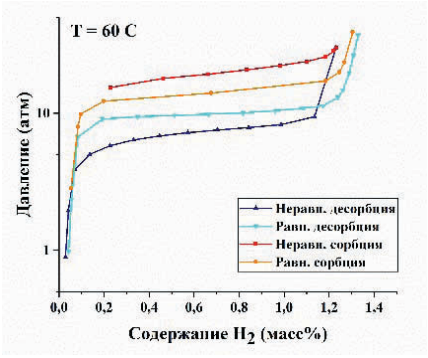


Рис. 3. PCT-изотермы для статичного и динамического методов

Динамический метод оказывается полезным для оценки реальных характеристик металлогидридных засыпок в условиях непрерывной работы технического устройства, например при топливообеспечении водородной энергоустановки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-1708.2014.8.

Литература

1. **Malyshenko, S.P., Mitrokhin S.V., and Romanov I.A.** Effects of scaling in metal hydride materials for hydrogen storage and compression // Journal of Alloys and Compounds. 2015. 645, Supplement 1: P. S84—S88.

A.N. Kazakov[1], *I.A. Romanov*[1], *K.V. Kuslin*[2]

[1]Joint Institute of High Temperature,
Russia, 111116, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 17A
[2]National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14

APPLICABILITY OF DYNAMIC METHOD TO PCT-MEASUREMENT OF METAL HYDRIDES

УДК 536.224

Н.А. Киселёв[1,2]*, *С.А. Бурцев*[2], *М.М. Стронгин*[1], *Ю.А. Виноградов*[1]

[1] Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119192, Москва, Мичуринский просп., 1

[2] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

*e-mail: kiselev.nick.a@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛУНОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В настоящее время наблюдается значительный интерес к вопросу повышения эффективности теплообменного оборудования, систем охлаждения газовых турбин и устройств газодинамического энергоразделения [1]. Во многих случаях решение этого вопроса сводится к задаче интенсификации теплообмена. В качестве интенсификаторов теплообмена в последние десятилетия рассматриваются ребра, штырьки, лунки или их комбинации. На фоне большинства известных интенсификаторов теплообмена особенно выделяются лунки, которые обеспечивают прирост теплообмена (1,3—3 раза), при незначительном увеличении гидравлического сопротивления (1—5 раз).

Анализ опубликованных работ показывает, что не всегда обычная сферическая лунка обладает наибольшей теплогидравлической эффективностью. Согласно численным расчетам, при той же глубине лунка более сложной конфигурации обеспечивает большую интенсификацию теплообмена при сравнимом приросте сопротивления. Следовательно, необходимо проведение сравнительного эксперимента, в котором рассматриваются теплогидравлические характеристики поверхностей с лунками различных форм.

В работе представлены результаты экспериментального исследования коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления на поверхностях, покрытых лунками. Рассматривались лунки шести различных форм: сферические, овальные и каплеобразные лунки, сферические лунки со скругленными кромками, повернутые каплеобразные лунки, а также лунки, полученные протяжкой сферы по дуге окружности. Диаметр инструмента и безразмерная глубина всех лунок оставалась постоянными.

Коэффициенты сопротивления и теплоотдачи определялись одновременно для гладкой и облуненной поверхностей за один пуск экспериментального стенда. Коэффициенты сопротивления определялись путем прямого взвешивания исследуемых моделей с помощью однокомпонентных тензовесов. Коэффициенты теплоотдачи определялись методом нестационарного теплообмена с использованием ИК-камеры [2]. Число Рейнольдса, определенное по длине пограничного слоя, менялось в диапазоне $0{,}2\cdot10^6$—$7\cdot10^6$.

Экспериментальные исследования показали, что облуненные поверхности обеспечивают осредненную интенсификацию теплообмена $St/St_0 = 1{,}17—1{,}27$ и осредненное увеличение сопротивления $c_x/c_{x0} = 1{,}03—1{,}53$ в зависимости от формы лунки. Анализ двумерных полей относительных коэффициентов теплоотдачи показал, что усложнение формы лунки не приводит к значительному увеличению осредненного значения коэффициента теплоотдачи. В лунках присутствуют застойные зоны с $St/St_0 = 0{,}85—1{,}0$ и области присоединения потока, для которых $St/St_0 > 1{,}50—1{,}58$. Каплеобразные лунки обеспечивают наибольший прирост теплообмена.

Относительный коэффициент сопротивления поверхностей с лунками сложных форм превышает значения относительного коэффициента сопротивления сферических лунок ($c_x/c_{x0} = 1{,}10$ и $c_x/c_{x0} = 1{,}03$ для сферических лунок с острой и скругленной кромкой). Максимальное увеличение сопротивления ($c_x/c_{x0} = 1{,}53$ и $c_x/c_{x0} = 1{,}52$) получено для каплеобразных лунок.

Максимальное значение $(St/St_0)/(c_x/c_{x0}) = 1{,}14$ имеет сферическая лунка со скругленными краями, максимальное значение $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})^{1/3} = 1{,}18$ соответствует сферической лунке. Минимальные значения $St/St_0)/(c_x/c_{x0}) = 0{,}80$ и $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})^{1/3} = 1{,}05$ имеет поверхность с каплеобразными лунками.

Полученные данные свидетельствуют о возможности опережающего роста интенсификации теплообмена по сравнению с ростом потерь.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-08-08428 и СП-1169.2015.1.

Литература

1. **Леонтьев А.И., Бурцев С.А**. Интенсификация теплообмена в устройстве газодинамического энергоразделения // Доклады Академии наук. 2016. Т. 471. № 3. С. 286—288.
2. **Experimental** investigation of heat transfer and drag on surfaces with spherical dimples / A.I. Leontiev et al. // Exp. Therm. Fluid Sci. 2016. Vol. 79.

N.A. Kiselev[1,2]*, S.A. Burtsev*[2]*, M.M. Strongin*[1]*, Yu.A. Vinogradov*[1]

[1]Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Russia, 119192, Moscow, Michurinskiy ave., 1
[2] Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER AND DRAG OF DIMPLES OF DIFFERENT SHAPE

УДК 62-977

И.Н. Киселёв, Р.В. Клейманов, А.В. Коршунов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: kleimanovrv@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЕМ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМОЙ В ДИФФУЗОРНОМ КАНАЛЕ

В различных теплофизических устройствах активно используются аэродинамические каналы с конфузорными и диффузорными течениями. Многие каналы имеют диффузорное течение, в которых образуются отрывы, снижающие эффективности устройства. Для управления отрывными течения в работе предлагается использование холодной плазмы, генерируемой диэлектрическим барьерным разрядом [1]. В данной работе рассматривается течение в плоском ассиметричном диффузоре и управление зонами отрыва барьерным разрядом.

Для исследования влияния холодной плазмы на течение был поставлен эксперимент на модели диффузора с углом раскрытия 12 градусов. Для обнаружения отрывных зон использовалась визуализация потока. Для оценки потерь в диффузоре по длине канала проводился отбор полного и статического давления.

В результате проведенного эксперимента удалось перемещать зону отрыва как по длине канала, так и добиться перемещения отрыва на стенку, параллельную потоку. Для смещения отрыва вниз по потоку активаторы плазмы размещались на обеих стенках диффузора и проводилась оценка затрат энергии для удержания безотрывного течения.

Литература

1. **Moreau E.** Airflow Control by Non-Thermal Plasma Actuators // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol. 40. P. 605—636.

I.N. Kiselev , R.V. Kleimanov, A.V. Korshunov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnichnichrskaya str., 29

FLOW CONTROL SYSTEM BY NON-THERMAL PLASMA IN DEFUSER CHANAL

УДК 62-977

И.Н. Киселёв, Р.В. Клейманов, А.В. Коршунов, М.В. Мишин*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: kleimanovrv@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА ПРОЦЕССЫ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

CVD (chemical vapor deposition — химическое осаждение из газовой фазы) — универсальный метод синтеза нанообъектов, позволяющий получать широкий спектр наноматералов: тонкие пленки, нанопорошки, нанотрубки, нановолокна. Одним из таких наноматериалов является сульфид молибдена, получивший применение в машиностроении, авиации, металлообработке, электрооборудовании благодаря своим антифрикционным свойствам [1].

В последнее время большой интерес представляет получение дисульфида молибдена из реагента «с одним источником прекурсоров», содержащим как атомы серы, так и атомы молибдена. В этом случае химические превращения протекают быстро, что позволяет осуществлять синтез в потоке газа в течение нескольких секунд [2].

Наиболее простым способом к использованию реагента «с одним источником прекурсоров» в качестве исходного продукта для ультразвукового спрей-пиролиза является введение аэрозоля его раствора в реактор. Таким образом можно обеспечить контроль в широком диапазоне экспериментальных условий, так как размер получаемых частиц дисульфида молибдена прямо пропорционален размерам частиц аэрозоля, вводимых в реактор. Изменяя концентрацию раствора, температуру в реакторе и параметры испарителя, можно контролировать размер и форму частиц, а добавлением поверхностно-активных веществ можно регулировать морфологию и пористость получаемых частиц.

Из-за достаточно низких скоростей течения газа в реакторе и высоких температур необходимо оценить влияние конвекции и термофореза на распределение частиц аэрозоля в реакторе. Изменение времени пребывания частиц аэрозоля в горячей зоне реактора приводит к неравномерному испарению аэрозоля и конгламерации, что служит причиной дисперсии получаемых частиц порошка по размеру.

В работе рассматривается численное моделирование в программном пакете COMSOL Multiphysics с целью оценить влияние теплообмена в горячей зоне газофазного химического реактора на интенсивность испарения частиц аэрозоля. В ходе расчетов учитывалось влияние термофореза на перенос частиц аэрозоля, вязкое трение и перенос частиц в потоке газа, испарение частиц аэрозоля и изменение количества движения частиц, вызванное испарением капель.

В ходе натурного эксперимента проводилось измерение с помощью оптической системы дисперсии частиц аэрозоля на входе в реактор, а также оценивалось распределение частиц полученного в ходе реакции нанопорошка по размерам.

Полученные в ходе моделирования зависимости позволили оптимизировать процесс химического осаждения наночастиц дисульфида молибдена из газовой фазы.

Литература

1. **Зеликман А.Н.** Молибден. М.: Металлургия, 1970. 440 с.
2. **Aleksandrov S.E., Filatov K.D., Tvurikov K.S.** Synthesis of molybdenum disulfide particles by aerosol-assisted chemical vapor deposition // Russian journal of applied chemistry. 2016. No 5 (89). P. 577—581.

I.N. Kiselev, R.V. Kleimanov, A.V. Korshunov, M.V. Mishin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnichnichrskaya str., 29

EFFECTS OF HEAT TRANSVER ON NANOPARTICLES CVD PROCESSES

УДК 532

А.В. Ковалев[1,2*], *А.А. Ягодницына*[1,2], *А.В. Бильский*[1,2]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

*e-mail: therfmig@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СНАРЯДНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ КАСТОРОВОЕ МАСЛО — ВОДА В ПРЯМЫХ И СЕРПАНТИННЫХ МИКРОКАНАЛАХ

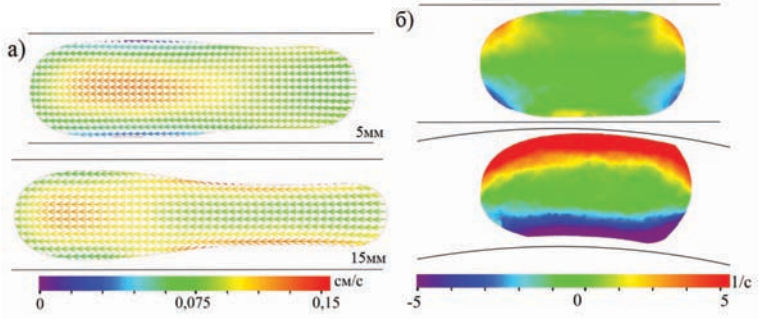
Течения газ—жидкость и жидкость—жидкость в микроканалах имеют огромный потенциал для повышения эффективности технологических процессов в большом количестве различных приложений. Так, течения несмешивающихся жидкостей могут на порядки сократить время протекания химических реакций и биологических анализов [1]. Из ряда режимов течений, реализующихся в двухфазных потоках, наиболее перспективным для практического применения является снарядный режим. Данный режим характерен для микроканалов и может быть использован как в биологических анализах за счет высокоточного контроля над отдельными снарядами дисперсной фазы, так и в химических реакциях, где перенос вещества интенсифицируется за счет большой площади контакта фаз и наличия областей циркуляции [2].

Тем не менее гидродинамика течений в снарядах и перемычках, факторы, определяющие их форму, а также механизм их формирования, необходимые для инженерных расчетов, остаются недостаточно изученными.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию структуры потока в снарядах дисперсной фазы при течении несмешивающихся жидкостей касторовое масло—вода в микроканалах прямоугольного сечения с Т-образным входом. В рамках исследований была проведена визуализация снарядного режима течения, установлены границы его устойчивости. С помощью метода PTV (Particle Tracking Velocimetry) были получены поля скорости в центральном сечении снарядов воды для различных комбинаций объемных расходов фаз. Все эксперименты проводились для каналов прямой и серпантинной формы, что позволило выявить влияние кривизны канала на распределение скорости.

Используемые жидкости представляли комбинацию вязкой несущей и невязкой дисперсной фазы, при этом вязкости фаз значительно различались (примерно в 730 раз). Начиная с отношения расходов дисперсной фазы к несущей больше единицы, $Q_w/Q_{co} \geq 1$, наблюдалась значительная деформация и удлинение снарядов вниз по течению (до 50 % начальной длины).

Данная деформация сопровождалась изменением полей скорости в снарядах (рис. 1, *а*), при этом в некоторых случаях имели место не две, как описано в литературе, а четыре области циркуляции: две в передней и две в хвостовой частях снаряда. Такой эффект до сих пор не наблюдался для течений несмешивающихся жидкостей. Возможный механизм, объясняющий явление, это баланс сил межфазного натяжения и вязкого трения на границе снаряда.



а) *б*)

Рис. 1. Характерное распределение в центральном сечении снаряда: *а* — скорости на расстоянии 5мм и 15мм от входа при $Q_w/Q_{co} > 1$; *б* — завихренности в прямом и криволинейном участках канала при $Q_w/Q_{co} < 1$

В серпантинных каналах была выявлена интенсификация циркуляции (рис. 1, *б*) при отношении расходов $Q_w/Q_{co} < 1$, то есть для снарядов неизменной формы.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 16-19-10519).

Литература

1. **Tran T.M., Lan F., Thompson C.S., Abate A.R.** From tubes to drops: droplet-based microfluidics for ultrahigh-throughput biology // J. Phys. D. Appl. Phys. 2013. V. 46. № 11. 114004 (17pp).
2. **Zhao C.-X., Middelberg A.P.J.** Two-phase microfluidic flows // Chemical Engineering Science. 2011. Vol. 66. P. 1394—1411.

A.V. Kovalev[1,2]*, A.A. Yagodnitsyna* [1,2]*, A.V. Bilsky* [1,2]

[1] Novosibirsk State University,
Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2
[2] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentiev ave., 1

AN EXPERIMENTAL STUDY OF CASTOR OIL – WATER PLUG FLOW IN STRAIGHT AND SERPENTINE MICROCHANNELS

УДК 532.529.5

И.А. Козулин[1,2]*, *В.В. Кузнецов*[1,2]

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1
*e-mail: igornt@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ СМЕСИ АЗОТ/ВОДА В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ

В настоящее время наблюдается рост интереса к исследованиям в области капиллярной гидродинамики и теплообмена в микросистемах [1]. Прикладные аспекты рассматриваемой проблемы связаны с перспективой применения каналов малого и сверхмалого размера для интенсификации тепломассопереноса в компактных энергетических устройствах [2].

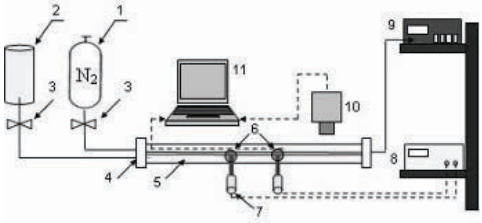
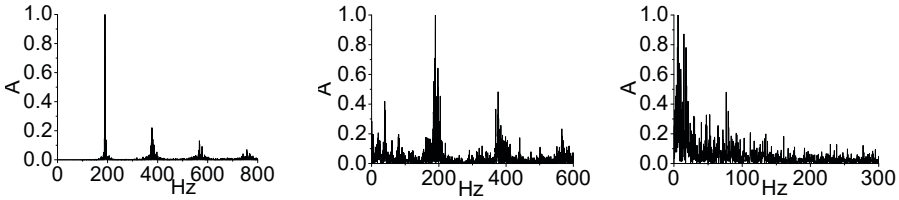


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Схема стенда для экспериментального исследования течения смеси азот/вода в горизонтальном микроканале сечением 315×250 мкм при расположении микроканала короткой стороной вниз приведена на рис. 1. В экспериментальной установке газ поступал из баллона *1* через регулировочный вентиль *3* в смеситель *4*. Вода поступала из бака *2*, через регулятор расхода жидкости *3* и попадала в смеситель *4*. Смеситель *4* представлял собой внутренний Т-образный вход и применялся для организации двухфазного течения в микроканале. Экспериментальный участок *5* — прямоугольный микроканал 315×250 мкм, длиной 270 мм. На выходе смесь откачивалась перистальтическим насосом *9*. Для исследования режимов газожидкостного течения использовался метод двойного лазерного сканирования. В данном методе два лазера *7* освещали одну из сторон прямоугольного канала. Питание лазеров осуществлялось источником напряжения *8*. Интенсивность прошедшего света измерялась с помощью фотодиодов *6*, расположенных на противоположной стороне канала. Сигналы с фотодиодов регистрировались



а) *б*) *в*)

Рис. 2. Фурье-спектр режимов течения: *а* — с удлиненными пузырями, $J_{liq} = 0.071$ м/с, $J_{gas} = 0{,}565$ м/с; *б* — переходного режима; $J_{liq} = 0{,}071$ м/с; $J_{gas} = 1.21$ м/с; *в* — кольцевого режима течения: $J_{liq} = 0{,}071$ м/с; $J_{gas} = 4{,}73$ м/с

с помощью АЦП и обрабатывались на компьютере *11*. Визуализация течения проведена с помощью высокоскоростной видеокамеры *10*.

Метод двулучевого лазерного сканирования позволил провести Фурье анализ сигналов, полученных с фотодиодов, определить статистические характеристики течения в микроканалах. Установлено, что в горизонтальном микроканале периодический режим с удлиненными пузырями, переходной и кольцевой режимы течения являются основными. На рис. 2 *а*, *б*, *в* приведен Фурье спектр для режима течения с удлиненными пузырями, переходного режима и кольцевого режима течения соответственно, в подрисуночной подписи представлены приведенные скорости жидкости J_{liq} и газа J_{gas}. На основании визуализации Фурье анализа и обработки данных по статистическим характеристикам построена карта режимов течения.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН при поддержке гранта РФФИ (№ 15-08-07506 А).

Литература

1. **Coleman J. W., Garimella S.** Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1999. Vol. 42. Is. 15. P. 2869—2881.
2. **Kuznetsov V. V., Shamirzaev A. S., Kozulin I. A.** Correlation of the Flow Patter and Refrigerant Flow Boiling Heat Transfer in Microchannel Heat Sink // Proceedings of the 6th European Thermal Sciences Conference, 4–7 September 2012, Poitiers. Futuroscope France. Paper A3669VK. 8 p.

I.A. Kozulin[1,2]*, V.V. Kuznetsov*[1,2]

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1
[2]Novosibirsk State University
Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogova str., 1

EXPERIMENTAL RESEARCH OF STATIONARY FLOW OF MIXTURE NITROGEN/WATER IN HORIZONTAL RECTANGULAR MICROCHANNEL

УДК 536.24

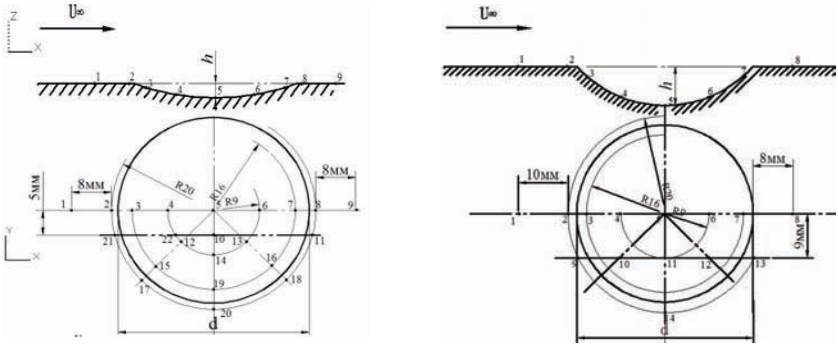
Дехай Кон, П.А. Семенев, В.Н. Афанасьев*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

*e-mail: kongdehai2013@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ОБТЕКАНИИ ОДИНОЧНОЙ ЛУНКИ

Исследование теплообмена и гидродинамики при обтекании углублений на исходно гладких поверхностях имеет большое практическое значение, поскольку углубления и полости, конструктивного или случайного происхождения, встречаются на многих конвективных поверхностях. В некоторых случаях при обтекании углубления отрыв пограничного слоя и его повторное присоединение приводит к возникновению специфических явлений, оказывающих существенное влияние на сопротивление и теплообмен, при которых наблюдается существенная интенсификация теплообмена без опережающего роста гидродинамического сопротивления [1—5]. В данной статье экспериментально исследуется структура турбулентного пограничного слоя, формирующегося при внешнем обтекании потоком воздуха поверхности с одиночным углублением (мелкая и глубокая полусферические лунки). Экспериментально измерялись значения средних скоростей и температур, а так же их пульсации в различных точках одиночного сферического углубления диаметром d = 37,5 мм и h = 2,5 мм (h/d = 0,067) для мелкой лунки и диаметром d = 36 мм и глубиной h = 8 мм (h/d = 0,222) для глубокой лунки при скорости внешнего потока 16,2 и 18,0 м/с, соответственно. Схемы лунок, точки замеров и их координаты показаны на рис. 1, *а* и *б*.



а) *б)*

Рис. 1. Точки замеров на поверхности одиночной полусферической лунки при безотрывном (*а*) и отрывном (*б*) обтекании

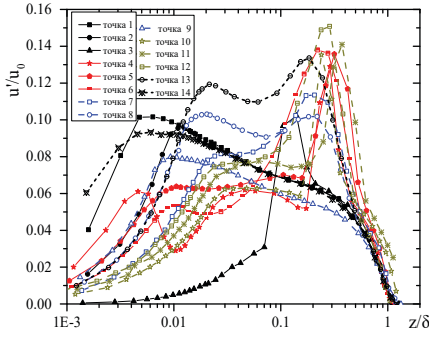


Рис. 2. Распределения пульсаций скорости на поверхности отрывной лунки

На рис. 2 представлены распределения пульсаций скорости на поверхности отрывной лунки. При обтекании лунки – внутри глубокой лунки – профили скорости и температуры изменились: внутри лунки отрыв потока и пульсации скорости и температуры имеют два максимума (рис. 2), т.е. два источника турбулентности — стенка (поверхность теплообмена) и зона смешения основного потока, двигающегося над лункой, и потока, истекающего из лунки. Наибольшая выработка турбулентности наблюдается на верхней границе вихревой зоны (в зоне смешения на уровне исходно гладкой поверхности).

В работе показано, что существенная интенсификация теплообмена наблюдается над полусферической лункой, а причиной увеличения теплоотдачи является пространственная неоднородность поля порождения турбулентности.

Литература

1. **Интенсификация** тепло-и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев и др.; под ред. Ю.А. Кузма-Кичта М.: ФГТУ «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. 532 с.
2. **Афанасьев В.Н., Леонтьев А.И., Чудновский Я.П.** Теплообмен и трение на поверхностях, профилированных сферическими углублениями. М.: МГТУ, 1990. 118 с. (Препр. МГТУ им. Баумана № 1-90).
3. **Гидродинамика** и теплообмен при обтекании одиночных углублений на исходно гладкой поверхности / В.Н. Афанасьев, А.И. Леонтьев, Я.П. Чудновский и др. М.: МГТУ, 1991. 140 с. (Препр. МГТУ им. Н.Э. Баумана № 2-91; часть 1 — 56 с.; часть 2 — 140 с.).
4. **Коваленко Г.В., Терехов В.И., А.А.Халатов В.И.** Режимы течения в одиночной лунке, расположенной на поверхности канала // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. № 6. С. 78—87.
5. **Численное** и экспериментальное исследование структуры течения при турбулентном обтекании одиночной «траншеи» / В.Н. Афанасьев, А.В. Недайвозов, П.А. Семенев, Кон Дехай // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 6. С. 47—70.

Dehai Kong, P.A. Semenev, V.N. Afanasiev

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN TURBULENT FLOW PAST A DIMPLE

УДК 621.175

А.В. Кондратьев, Е.Ю. Корлякова*

ЗАО «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон»,
248010, г. Калуга, ул. Комсомольская Роща, 43

*e-mail: turbocon@kaluga.ru

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ СУХИХ ГРАДИРЕН И ВОЗДУШНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

В настоящее время все большую популярность приобретают сухие градирни и воздушно-конденсационные установки, поскольку они не требуют наличия источника воды для отвода тепла от пара в конденсаторе и, таким образом, не требуют привязки электростанций к водоемам.

При эксплуатации подобных установок могут возникать вопросы касательно режимов их работы при различных температурах окружающего воздуха и предпочтительных способов осуществления их регулирования.

Кроме того, производители оборудования склонны указывать максимально возможную величину коэффициента теплопередачи для теплообменной поверхности сухой градирни (СГ) или воздушного конденсатора (ВК), в реальных же условиях всегда присутствует некоторое загрязнение теплообменников, а также ряд несоответствий конструкции проектным решениям.

Для проверки гарантийных характеристик СГ и ВК требуется измерение большого количества параметров работающих установок.

Кроме того, в промышленном эксперименте не всегда есть возможность перехода на интересующий испытателей режим работы, поскольку станция несет нагрузку, величина которой определяется требованиями электросетей. По этой же причине отсутствует возможность демонтажа штатных измерительных приборов с целью их совместной калибровки.

К примеру, имея неучтенные погрешности в пределах 1—2 °С, показания датчиков температуры теплоносителя на входе и выходе из теплообменной поверхности будут вполне актуальны для управления градирней или ВК. Однако при оценке величины теплосъема на режимах с низкой нагрузкой температурный напор теплоносителя может иметь сопоставимую величину порядка 3—5 °С и соответственно высокую относительную ошибку.

По причинам, перечисленным выше, проведение и обработка промышленных испытаний ВК и СГ имеют ряд особенностей.

Определять величину тепловой нагрузки необходимо одновременно по каждому из двух теплоносителей (воздух и пар/вода), а затем составлять уравнение тепловых балансов и вычислять величину их невязки. По вели-

чине невязки тепловых балансов можно сделать вывод о правильности расчетов.

Тепловая нагрузка, принимаемая охлаждающим воздухом, рассчитывается как произведение его расхода на теплоемкость и величину нагрева. При этом расход охлаждающего воздуха следует получать из непосредственных измерений. Для этого на выходе из диффузора вентилятора размещаются датчики скорости потока воздуха и термопары, закрепленные рядом с ними. Для учета возможной несимметричности поля скоростей измерения проводятся минимум на двух диаметрах. Затем строится осредненная зависимость скорости воздуха от радиуса измерения. После интегрирования полученного тела вращения находят величину объемного расхода воздуха на выходе из диффузора вентилятора.

Температура воздуха вычисляется по показаниям термопар. Испытания показали, что в большинстве случаев среднее арифметическое от показаний термопар с достаточной точностью совпадает с результатом вычислений средней температуры с введением весовых коэффициентов к показаниям термопар в зависимости от расходов воздуха, проходящего в их окрестностях. К примеру, при измерении скоростей и температур охлаждающего воздуха в 11 точках значение средней температуры, полученное первым способом, составило 32,18 °С, а полученное вторым способом — 32,55 °С.

При измерении температуры воздуха на входе в теплообменные модули следует исключить или учитывать величину рециркуляции. Для этого проводятся измерения температуры воздуха под теплообменниками по углам установки, а также на расстоянии более 50 м от нее.

Также при исследовании отдельных секций ВК или СГ важно учитывать скорость и направление ветра в момент испытаний. Кроме того, испытания не всегда удается провести на стационарном режиме работы станции, в таких случаях требуется принимать во внимание тепловую инерционность конструкции.

Литература

1 **Мильман О.О., Фёдоров В.А.** Воздушно-конденсационные установки. М.: Издательство МЭИ, 2002. 208 с.

2. **Справочник** по теплопередаче. Т. 1. / под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.

A.V. Kondratev, E.J. Korliakova

Joint Stock Scientific Production Company «Turbocon»,
Russia, 248010, Kaluga, Komsomolskaya Roscha str., 43

REZULTS HANDLING PROCEDURE FOR DRY COOLING TOWERS' AND AIR-COOLED CONDENSERS' FULL-SCALE THERMAL TESTING

УДК 53.087

*Д.Д. Леонтьев**

Научно-исследовательский институт механики
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,
119192, Москва, Мичуринский пр., 1

*e-mail: leontev.dd15@physics.msu.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УДАРНОЙ ТРУБЕ

Работа посвящена рассмотрению физических процессов, протекающих в ударной трубе. Особое внимание уделяется измерению давления в сверхзвуковом потоке газа внутри ударной трубы.

Ударная труба служит для моделирования экстремальных условий в газе, что имеет огромное значение для физических исследований. Используя ее, становится возможным изучение свойств процессов, протекающих в результате возникновения ударной волны. Измерение давления и скорости газа выявляет характерные особенности его течения и тем самым позволяет исследовать изменение температуры, плотности газа, перенос вещества, массообмен. Предполагается, что предмет доклада имеет прикладное значение для изучения закономерностей процессов теплообмена в среде с точки зрения постановки эксперимента и обработки его результатов.

Первая часть работы содержит систематизацию и представление информации о существующих видах измерительных датчиков давления, при помощи которых можно получить данные о давлении в потоке газа. Существует необходимость в сравнении устройства, принципа работы различных датчиков, установлении связи между техническими особенностями датчиков и диапазоном, точностью физических измерений, проводимых с их использованием.

Другая часть работы предполагает анализ результатов измерений, полученных с использованием пьезоэлектрических датчиков и манометров, измеряющих статическое давление в камерах ударной трубы до возбуждения в ней ударной волны.

Результатом анализа данных будут служить калибровочные зависимости для датчиков динамического давления нескольких типов разных изготовителей, выводы о преимуществах, недостатках и специфике обработки данных измерений при использовании каждого из них в эксперименте.

D.D. Leontyev

Institute of Mechanics Lomomosov Moscow State University
Russia, 119192, Moscow, Michurinskiy pr., 1

DYNAMIC PRESSURE SENSORS IN SHOCK TUBE EXPERIMENTS

УДК 621.9

А.Р. Лепешкин[1], *А.В. Баженова*[2], *А.Н. Андросович*[2], *В.А. Голиков*[2], *О.И. Ильинская*[2], *В.В. Назаров*[3]

[1] Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2

[2] Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993, Москва, Волоколамское ш., 4

[3] Институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 119192, Москва, Мичуринский просп., 1

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО И ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ТУРБИН ГТД С ТЗП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ

Совершенствование системы внутреннего теплоотвода сопровождается ростом термонапряженности в охлаждаемых деталях турбомашин. Для обеспечения работоспособности высокоэффективных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) новых поколений необходимо создание новых жаропрочных материалов, а также улучшение защиты деталей высокотемпературного тракта ГТД и ГТУ с помощью теплозащитных (ТЗП) и жаростойких покрытий [1, 2, 4, 5]. Наиболее эффективная защита материала детали от теплового потока с помощью ТЗП происходит в случае использования керамических покрытий на основе диоксида циркония.

Разработана расчетно-экспериментальная методика моделирования нестационарного теплового и термонапряженного состояния охлаждаемых лопаток турбин ГТД с керамическими теплозащитными покрытиями с использованием тепловизионной системы. С учетом особенностей разработанной методики проводились термоциклические испытания охлаждаемых лопаток турбин ГТД с ТЗП на специальной установке с воспроизведением эксплуатационных нестационарных тепловых режимов, термонапряженного состояния [1, 2] и подачей заданного расхода охлаждающего воздуха. Установка оснащена ламповым генератором и тепловизионной системой измерения температур поверхности изделий. Моделирование нестационарного теплового и термонапряженного состояния охлаждаемых лопаток осуществлялось с использованием высокочастотного (ВЧ) индукционного нагрева и тепловизионной системы. Численное моделирование комплексных задач теплового и термонапряженного состояния модели охлаждаемой лопатки турбины с использованием теории упругости рассмотрено в [3]. В данной работе представлено численное моделирование нестационарного термона-

пряженного состояния охлаждаемой лопатки турбины ГТД в упруго-пластической области. Для определения необходимых режимов ВЧ нагрева деталей и режимов работы испытательного оборудования стенда разработан комплекс математических моделей и программ, обеспечивающих расчет нестационарного теплового и упруго-пластического термонапряженного состояния охлаждающих лопаток с керамическими ТЗП, параметров охлаждающего воздуха и устройств нагрева (индукторов) с использованием численных методов оптимизации и конечных элементов. Полученные результаты математического моделирования были использованы при термоциклических испытаниях натурных охлаждаемых лопаток турбин авиационных ГТД с керамическими ТЗП с использованием тепловизионной системы.

Литература

1. **Lepeshkin A.R., Feng Shi.** Ceramic Coatings — Applications in Engineering. Intech. 2012. 320 p.
2. **Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б.** Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. Новосибирск: НГТУ, 2006. 286 с.
3. **Spalding B., Артемов В.И.** Численное моделирование комплексных задач гидродинамики, теплообмена и упругости. Термические напряжения в модели охлаждаемой лопатки газовой турбины // XVII школа-семинар молодых ученых и специалистов «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях». М.: ЦАГИ, 2009.
4. **Лопатка** турбины: Патент № 2259481 РФ / А.Р. Лепешкин, Н.Г. Бычков и др. // 2005. Бюл. № 24.
5. **Жаровая** труба камеры сгорания: Патент № 2260156 РФ / А.Р. Лепешкин, Н.Г. Бычков и др. // 2005. Бюл. № 25.

A.R. Lepeshkin [1], *A.V. Bazhenova* [2], *A.N. Androsovich* [2], *V.A. Golikov* [2], *O.I. Ilinskaya* [2], *V.V. Nazarov* [3]

[1]Central Institute of Aviation Motors,
Russia, 111116, Moscow, Aviamotornaya str., 2
[2]Moscow Aviation Institute (National Research University),
Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoe sh., 4
[3]Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University,
Russia, 119192, Moscow, Michurinskiy ave., 1

THE FEATURES OF SIMULATION OF UNSTEADY THERMAL AND THERMAL STRESS STATE OF GTE TURBINE COOLED BLADES WITH TBC USING THERMAL IMAGING SYSTEM

УДК 536.4, 661.1

М.С. Макаров[1], *С.Н. Макарова*[1,2], *А.А. Шибаев*[1,2]*

[1]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
[2]Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 3
*e-mail: aleksandr.a.shibaev@yandex.ru

ТЕПЛОМАССООБМЕН ПРИ СУБЛИМАЦИИ ОДИНОЧНЫХ ЧАСТИЦ ЛЕТУЧИХ БЕТА-ДИКЕТОНАТОВ МЕТАЛЛОВ

Процессы тепло- и массообмена при сублимации твердых частиц имеют важное значение для установления оптимальных режимов работы криогенных установок, для интенсификации процесса низкотемпературной сушки фармацевтических препаратов, а также при разработке новых технологий химического осаждения. Большой практический интерес представляют технологии получения керамического термобарьерного покрытия на лопатках газотурбинных двигателей методом химического осаждения из газовой фазы с использованием летучих соединений металлов с органическими лигандами. Для реализации технологии необходимо обеспечить достаточно высокие скорости роста получаемой оксидной пленки за счет сублимации прекурсоров в условиях интенсивного тепло- и массообмена [1].

В данной работе предложена физико-математическая модель нестационарной сублимации одиночной частицы прекурсора сферической формы, витающей в потоке газа носителя среднего давления. Считается, что процесс сублимации со всей поверхности сферы происходит с одинаковой интенсивностью, зависящей от времени нахождения частицы в нагретом несущем потоке. Во время сублимации частица не теряет сферической симметрии. При таких допущениях процесс тепломассообмена на поверхности частицы может быть описан системой параболических дифференциальных уравнений теплопроводности и диффузии второго порядка. Основной особенностью метода решения было интегрирование уравнений в подвижных координатах. Положение границы фазового перехода определялось по интенсивности сублимации и зависело от времени. В диффузионном режиме интенсивность тепло- и массообмена на границе раздела фаз определялась из сопряженного решения дифференциальных уравнений, а в режиме вынужденной конвекции из законов тепломассообмена на границе сферы: $Nu = 2 + 0{,}6Re_d^{0{,}5}Pr^{0{,}33}$, $Sh = 2 + 0{,}6Re_d^{0{,}5}Sc^{0{,}33}$.

Проведено численное исследование влияния размеров частицы и скорости ее обтекания, температуры и рода газа-носителя на динамику процесса сублимации летучих β-дикетонатов хрома (III) и циркония (IV). Показано, что выбор гелия в качестве газа-носителя приводит к повышению интенсивности сублимации. На рис. 1 приведено изменение массовой скорости

сублимации трис-ацетилацетоната хрома с течением времени нахождения частицы в несущем потоке аргона. На рис. 2 представлена зависимость времени полной сублимации частиц $Cr(acac)_3$ в потоке Ar. Для крупных частиц повышение скорости потока значительно уменьшает время полной сублимации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10325).

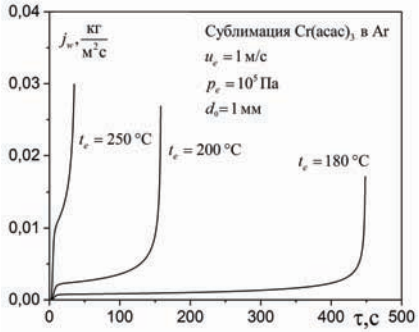


Рис. 1. Изменение во времени интенсивности поперечного потока вещества над сублимирующей поверхностью частицы трис-ацетилацетоната хрома при различных температурах потока аргона

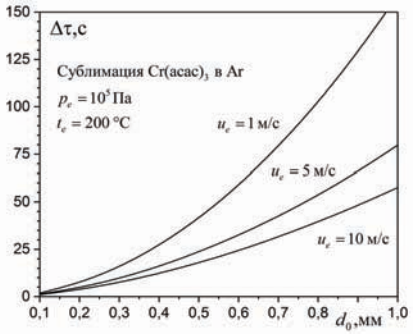


Рис. 2. Время полной сублимации прекурсора $Cr(acac)_3$ в зависимости от диаметра частиц при различных скоростях потока Ar

Литература

1. **Vahlas C., Caussat B., Senocq F. et al.** // Chem. Vap. Deposition. 2007. Vol. 13. P. 123—129.

M.S. Makarov [1], *S.N. Makarova* [1,2], *A.A. Shibaev* [1,2]

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1
[2]Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, SB RAS
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 3

HEAT AND MASS TRANSFER BY SINGLE PARTICLE SUBLIMATION OF VOLATILE METAL BETA-DIKETONATES

УДК 621.175

О.О. Мильман, В.С. Крылов, А.В. Птахин, А.В. Кондратьев*

ЗАО «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон»,
248010, г. Калуга, ул. Комсомольская роща, 43

*e-mail: turbocon@kaluga.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ С МАССОВЫМ СОДЕРЖАНИЕМ НЕКОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ ДО 20%

Реализация проекта высокотемпературной паротурбинной установки напрямую связана с вопросами конденсации пара, содержащего большое (до 15—20 % по массе) количество неконденсирующихся газов. Конструкции современных конденсационных установок не рассчитаны на эффективную работу при большом содержании неконденсирующихся газов, они не могут обеспечить высокий коэффициент теплоотдачи α и массообмена β от парогазовой смеси к стенке на фоне роста концентрации газов по мере конденсации пара [1]. Расчет такого устройства не имеет методической базы и надежных экспериментальных данных для определения α и β.

В связи с этим разработана конструкция и проведены исследования высокоэффективного конденсатора пара для получения опытных данных, разработки методик расчетов и обоснования принципов проектирования.

Описание стенда. Подвод пара в конденсатор проводится через паровой коллектор с выравнивающей решеткой, после которой пар поступает на теплообменный модуль. Перед трубным пучком измеряется давление. Пар проходит через шесть групп теплообменных труб (рис. 1), каждая из которых имеет самостоятельный подвод и отвод охлаждающей воды.

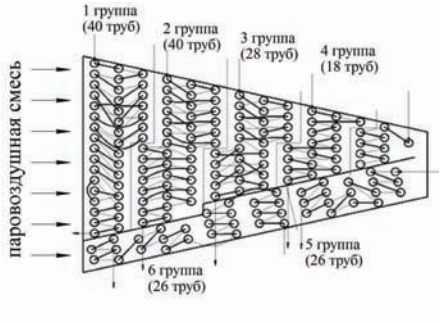


Рис. 1. Расположение трубных пучков экспериментального образца высокоэффективного конденсатора и распределение по группам

Трубные пучки сформированы таким образом, что теплообменный модуль имеет треугольную форму. Это позволяет сгруппировать конденсатор из нескольких теплообменных модулей необходимой тепловой мощности с контролем процессов тепломассопереноса в различных зонах трубного пучка. Также такая компоновка обеспечивает практически постоянную высокую скорость паровоздушной смеси по мере ее конденсации.

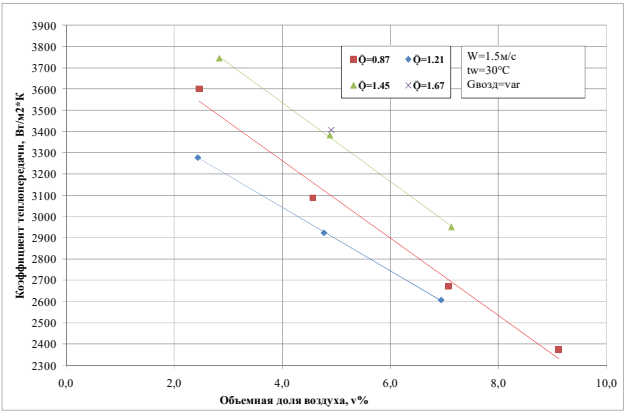


Рис. 2. Зависимости среднего коэффициента теплопередачи от массовой доли воздуха при разных относительных тепловых нагрузках

Результаты испытаний. На рис. 2 представлены зависимости среднего коэффициента теплопередачи от объемной доли воздуха при разных относительных тепловых нагрузках. Здесь и далее относительная тепловая нагрузка определяется как $\bar{Q} = Q/Q_{ном}$, где $Q_{ном}$ = 87,6 кВт по расчетам экспериментальных данных.

Выводы:

1) с увеличением расхода неконденсирующихся газов эффективность разработанного конденсатора снижается, но остается на приемлемом уровне [значения среднего коэффициента теплопередачи на номинальном режиме при v = 8,9 % составляет 2606 Вт/(м^2·К)];

2) в конденсаторах такого типа влияние неконденсирующихся газов меньше, чем в классических конденсаторах: при конденсации пара с объемным содержанием до 9 % неконденсирующихся газов коэффициент теплопередачи уменьшается в 1,6—2,5 раза, тогда как классические конденсаторы с такими параметрами не работоспособны.

Литература

1. **Фёдоров В.А., Мильман О.О.** Конденсаторы паротурбинных установок. М.: Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана, 2013. 163 с.

O.O. Milman, V.S. Krylov, A.V. Ptakhin, A.V.Kondratev

Joint Stock Scientific Production Company «Turbocon»,
Russia, 248010, Kaluga, Komsomolskaya Roscha str., 43

INVESTIGATION OF HIGH PERFORMANCE CONDENSER FOR CONDENSATION OF STEAM-GAS MIXTURE WITH MASS CONCENTRATION OF NONCONDENSIBLES UP TO 20 %

УДК 526.2

В.Ю. Митяков, М.А. Греков, А.А. Гусаков, В.В. Сероштанов, А.В. Башкатов, А.Н. Дымкин, А.В. Павлов, О.А. Мильто, К.С. Калмыков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА У ПОВЕРХНОСТИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО И НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРЯМОГО РЕБРА

Для комплексного исследования течения и теплообмена у поверхности прямого ребра предложено совместить градиентную теплометрию с PIV и тепловизионной диагностикой. Исследовано полое ребро с нагревом насыщенным паром, изотермическая поверхность которого моделирует идеальное ребро. В тех же гидродинамических режимах исследованы течение и теплообмен у поверхности сплошного ребра тех же размеров и формы, выполненного из стали 12Х18Н9Т. Показано, что такой подход позволяет оценить и сопоставить гидродинамические и тепловые параметры, а также учесть в расчетах изменение коэффициента теплоотдачи по поверхности ребра.

V.Y. Mityakov, M.A. Grekov, A.A. Gusakov, V.V. Seroshtanov, A.V. Bashkatov, A.N. Dymkin, A.V. Pavlov, O.A. Milto, K.S. Kalmykov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

COMPREHENSIVE RESEARCH OF FLOW AND HEAT TRANSFER NEAR THE SURFACE OF ISOTHERMAL AND NONISOTHERMAL REGTANGULAR FIN

УДК 536.24: 532.529

В.Ю. Митяков, Э.Р. Зайнуллина, А.Ю. Бабич, О.А. Мильто, К.С. Калмыков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ

Методом градиентной теплометрии исследован теплообмен при конденсации насыщенного водяного пара на поверхности трубки, выполненной из стали 12Х18Н9Т. Экспериментальная установка позволяет задавать различные направления для пара и охлаждающей воды, изменять ориентацию трубы в пространстве, а также поворачивать трубу вокруг оси. В опытах удается определить коэффициенты теплоотдачи в местах монтажа датчиков, а также изучить изменение коэффициентов теплоотдачи по длине трубы и при изменении азимутального угла. Результаты удовлетворительно коррелируют с расчетами по апробированным зависимостям, что подтверждает продуктивность развиваемого подхода и определяет направления дальнейших исследований.

V.Y. Mityakov, E.R. Zainullina, A.U. Babich, O.A. Milto, K.S. Kalmikov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St.Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

GRADIENT HEATMETRY WHILE RESEARCHING CONDENSATION ON THE TUBE SURFACE

УДК 621.9

*Л.Л. Мягков, Н.С. Маластовский, А.С. Блинов**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5

*e-mail: mr.blinoff1@yandex.ru

ИСПАРЕНИЕ ВОДНОГО РАСТВОРА И РАСПАД МОЧЕВИНЫ В СИСТЕМЕ ОБРАБОТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ

Введение. Создание перспективных дизельных двигателей во многих случаях сопряжено с разработкой систем обработки отработавших газов, обеспечивающих современный уровень выбросов токсичных веществ. Использование методов вычислительной газовой динамики при проектировании подобных систем является актуальной задачей, имеющей значительную практическую ценность.

В рамках данного исследования рассмотрена методика численного моделирования термического распада водного раствора мочевины на базе программного комплекса ANSYS FLUENT. Проведено сравнение результатов с существующими экспериментальными данными [1]. Проведена оценка степени распада реагента в системе SCR (селективная каталитическая нейтрализация) перспективного дизельного двигателя.

Основная часть. Эффективность системы SCR непосредственно зависит от концентрации поступающего в восстановительный катализатор аммиака (NH_3). Процесс его образования в результате термического разложения водного раствора мочевины может быть представлен в виде цепочки последовательных превращений (рис. 1): испарение воды, сублимация мочевины, ее термолиз, гидролиз изоциановой кислоты [2].

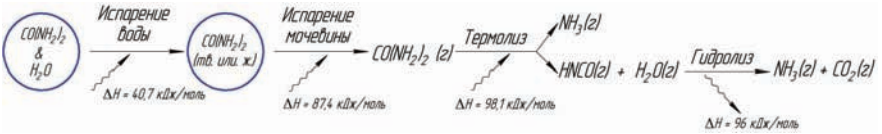


Рис. 1. Процесс термического разложения водного раствора мочевины

В данной работе в рамках подхода Эйлера—Лагранжа сплошная среда рассчитывается на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса, а составляющие дисперсной фазы — капли раствора мочевины — определяются в лагранжевых координатах [3]. Сопряжение непрерывной и дискретной фазы осуществляется с помощью модели DPM (Discrete Phase Model) в результате решения уравнений обмена (импульса, массы и энергии). Для моделирования испарения капель водного раствора мочевины использовалась предусмотренная в ПК ANSYS FLUENT многокомпонентная модель (Multicomponent Particle Definition), учитывался конвективный и

диффузионный механизм переноса вещества. Изменение упругости водяного пара над поверхностью капли в процессе испарения определяется в соответствии с законом Рауля. Скорости химических реакций термолиза и гидролиза определяются по закону действующих масс. Выражения констант скоростей реакций в форме уравнений Аррениуса взяты из работы [2].

Полученные результаты численного моделирования (рис. 2) были сопоставлены с экспериментальными данными работы [1].

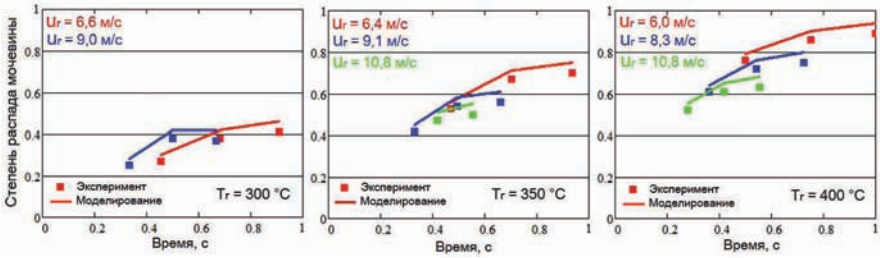


Рис. 2. Сравнение полученных результатов с экспериментом

Используя рассмотренную в данной работе методику оценки термического распада мочевины, проведена оценка степени ее распада в системе SCR перспективного дизельного двигателя.

Литература

1. **Kim J.Y., Ryu S.H., Ha J.S.** Numerical prediction on the characteristics of spray-induced mixing and thermal decomposition of urea solution in SCR system // Proc. 2004 Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division. Long Beach, California USA, 2004.
2. **Nova I., Tronconi E.** Urea-SCR Technology for deNOx After Treatment of Diesel Exhausts. New York: Springer, 2014. 716 p.
3. **ANSYS Fluent** Theory Guide, https://support.ansys.com/AnsysCustomerPortal/en_us/Knowledge+Resources/Online+Documentation/Current+Release ([cit. 2014-05-15]).

L.L. Myagkov, N.S. Malastowski, A.S. Blinov

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

EVAPORATION AND THERMAL DECOMPOSITION OF UREA WATER SOLUTION IN DIESEL EXHAUST AFTERTREATMENT SYSTEM

УДК 621.1

М.А. Никифоров[1,2]*, *А.А. Сухих*[2]

[1]ООО «Инженерно-технический центр»,
119526, Москва, просп. Вернадского, 101, корп. 3
[2]Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14
*e-mail: nikiforovma@mpei.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

При большом разнообразии теплоизоляционных и обмуровочных материалов задача определения оптимальной конструкции и выбора материалов тепловой изоляции оборудования имеет первоочередное значение. Такая конструкция должна удовлетворять не только требованиям эксплуатационной надежности (эксплуатация элементов тепловой изоляции при температурах меньших, чем максимально допустимая), но и иметь минимальную стоимость. Характеристики каждого слоя имеют ключевое значение при проектировании конструкции тепловой изоляции и являются одним из критериев при решении задачи оптимизации. В качестве примера была рассмотрена конструкция обмуровки парового котла, модель которой состоит из обмуровочной плиты и двух слоев тепловой изоляции с заданными толщинами δ_1, δ_2, δ_3 и коэффициентами теплопроводности λ_1, λ_2, λ_3 соответственно (рис. 1).

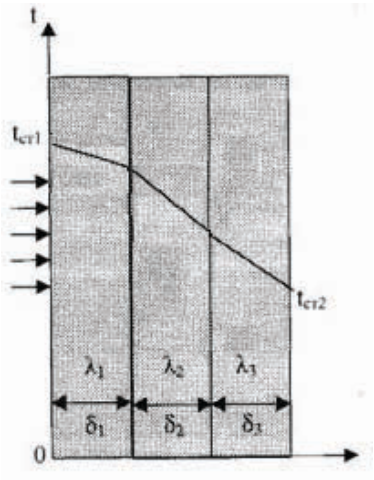


Рис. 1. Модель многослойной обмуровки котла

Математическая постановка задачи включает в себя систему уравнений, состоящую из уравнений теплопередачи через плоскую стенку для каждого слоя тепловой изоляции с учетом зависимости коэфициента теплопроводности от температуры и уравнения свободной конвекции через внешний слой тепловой изоляции. Система уравнений дополняется соответствующими граничными условиями и исходными данными. Вышеприведенная математическая модель была реализована в математическом пакете MathCAD.

Решением данной системы уравнений являются температурное поле по толщине конструкции тепловой изоляции, позволяющее судить о возможности применения выбранного теплоизоляционного ма-

териала, а также температура на поверхности внешнего слоя тепловой изоляции и тепловые потери с него, показывающие соответствие в целом расчитанной конструкции установленным нормам и правилам. На основе полученных при моделировании данных проводится вычисление расходов на изготовление и монтаж конструкции.

В докладе будут представлены результаты расчетов температурного поля и сравнительный анализ стоимости основных вариантов используемых и предлагаемых к внедрению конструкций тепловой изоляции.

Литература

1. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. М.: Энергия, 1983. 440 с.
2. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
3. **СНиП** 41-03-2003 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов.

M. Nikiforov [1,2], *A. Sukhih* [2]

[1]«Engineering and Technology Center» LLC,
Russia, 119526, Moscow, Vernadsky ave., 101, korp. 3
[2]National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14

DETERMINATION OF TEMPERATURE FIELD MULTILAYER THERMAL INSULATION

УДК 533.6.011.6

К.С. Новикова, С.В. Веретенников

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

НЕСТАЦИОНАРНОСТЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВИХРЕВЫХ ТРУБ И АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Одним из перспективных направлений экспериментального исследования вихревого эффекта является изучение влияния аэроакустического взаимодействия газодинамических структур на эффективность энергопереноса и изучение методов управления динамикой микроструктуры потока в вихревой трубе.

Температурная стратификация в вихревой трубе существенно зависит от макро- и микроструктуры течения в камере энергоразделения, отличающегося наличием двух вихрей: периферийного и квазипотенциального приосевого, раскручиваемого периферийным потоком. При этом движение этих вихрей во взаимно противоположном направлении приводит к дополнительной турбулизации и усложнении структуры потока [1, 2].

Газодинамика течения в камере энергоразделения в значительной степени определяется воздействием нестационарных возмущений в виде сгенерированных когерентных вторичных вихревых структур — жгутов, опоясывающих прецессирующее приосевое ядро. Возникновение крупномасштабных вихревых жгутов (КВС) на границе раздела вихрей вызвано их сдвиговыми скоростями в направлении осевой координаты. Это подтверждается компьютерной визуализацией течения в камере энергоразделения (рис. 1).

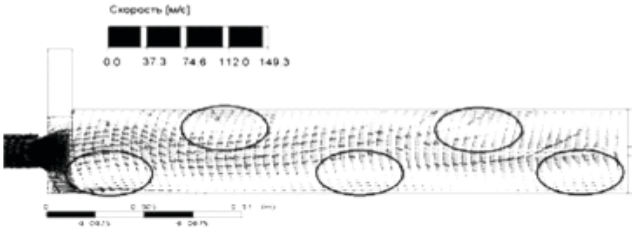


Рис. 1. Визуализация течения. Формирование КВС [1]

Генерация КВС в совокупности с характерной газодинамикой течения приводят к возникновению акустического излучения. Опубликованные экспериментально полученные спектры пульсаций давления в вихревых трубах выявили наличие двух максимумов пульсаций давления на частотах 1,3 и 16 кГц [2] (рис. 2).

В трехмерном нестационарном течении наиболее существенными проявлениями неустойчивости являются низкочастотные (1—2 кГц), вероятно вызванные взаимодействием КВС и прецессией, и высокочастотные (12—18 кГц) пульсации давления, связанные с турбулентной структурой течения. Акустическое излучение в определенной мере может характеризовать нестационарность газодинамических процессов в вихревой трубе.

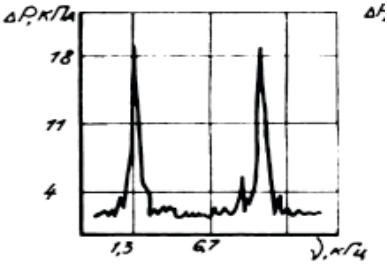


Рис. 2. Акустическая характеристика потока в вихревой трубе [2]

В работе представлены результаты стационарных и нестационарных численных расчетов, позволяющих определить характерные временные и геометрические масштабы вторичных вихревых структур. Полученные результаты являются основой для расчета акустического излучения вихревой трубы. Для верификации результатов численного моделирования проведены экспериментальные исследования акустического излучения вихревой трубы и измерение интегральных параметров процесса энергоразделения.

Литература

1. **Пиралишвили Ш.А.** Вихревой эффект. Физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование. Том 1. М.: ООО «Научтехлитиздат», 2013. 342 с.
2. **Пиралишвили Ш.А.** Вихревой эффект. Теория, эксперимент, численное моделирование // Технические науки. Машиноведение и машиностроение. 2013. С. 27.

K.S. Novikova, S.V. Veretennikov

Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia, 152934, Rybinsk, Pushkin str., 53

VORTEX TUBES WORKING PROCESS UNSTABILITY AND ACOUSTIC RADIATION

УДК 621.43

Д.О. Онищенко, Р.Е. Буданов, Н.С. Ложкин

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРЫШКИ ЦИЛИНДРА ДИЗЕЛЯ ЧН21/21

Форсирование двигателя и интенсификация рабочего процесса приводят к увеличению максимального давления газов в цилиндре, а также увеличению тепловой напряженности деталей. Отсюда следует необходимость выполнить моделирование ТНДС основных деталей, образующих газовый стык двигателя.

В данной работе были получены граничные условия, а также выполнен расчет теплонапряженно-деформированного (ТНДС) состояния крышки цилиндра дизеля ЧН21/21.

Моделирование рабочего процесса было выполнено для моделей сгорания Магнуссена—Хартагера и трехзонной расширенной модели когерентного пламени (ECFM-3Z). В результате полученных данных была выбрана модель и переменный параметр для расчета индикаторной диаграммы, максимально соответствующей экспериментальной.

В результате проведенного трехмерного нестационарного расчета рабочего процесса двигателя получены значения нестационарных термических граничных условий второго рода со стороны рабочего тела.

На основании полученных значений тепловых потоков можно выполнить расчет ТНДС крышки цилиндра. Для оценки напряженно-деформированного состояния использована трехмерная конечно-элементная модель сборки втулки, крышки цилиндра и блока с контактным взаимодействием через зону расположения прокладки с предварительно назначенными контактными парами.

В результате теплового расчета были определены поля распределения температур. Расчет НДС от монтажных нагрузок сборочного узла проводился в два этапа: 1) рассматривались напряжения от затяжки силовых шпилек; 2) рассматривались НДС крышки цилиндра и других сборочных деталей от тепловых нагрузок и максимального давления газов в цилиндре, проверялась работоспособность стыка с дополнительными нагрузками. В качестве граничных условий для прочностного расчета задавались следующие факторы:

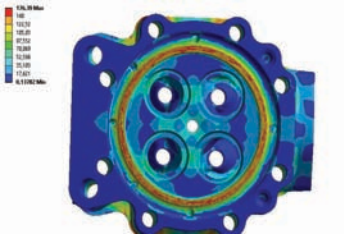


Рис. 1. Результаты расчета ТНДС крышки цилиндра

- распределение температур для поверхностей всех деталей;
- максимальное давление газов Pz;
- усилие от затяжки силовых шпилек, форсунки.

Контактные давления от запрессовки седел клапанов и направляющих заданы исходя из предоставленных данных заводом-изготовителем.

В результате проведенного расчета определены эквивалентные напряжения для всех деталей расчетной модели. На рис. 1 показаны эквивалентные напряжения для крышки цилиндра.

Литература

1. **Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А.** Трехмерное моделирование нестационарных теплофизических процессов в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 85 с.
2. **Двигатели** внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: учебник для втузов / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; под ред. А.С. Орлина, М.С. Круглова. — 4-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1983. 372 с.
3. **FIRE.** Users Manual. AVL List GmbH Graz, Austria, 2013.
4. **Онищенко Д.О.** Улучшение эффективных и экологических показателей дизеля и снижение тепловых нагрузок на его основные детали: Дисс... докт. техн. наук (05.04.02). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 234 с.
5. **Кавтарадзе Р.З.** Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов. — 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 590 с.
6. **Magnussen B.F., Hjertageron B.H.** On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // Symposium (International) on Combustion. 1977. P. 719—729.
7. **Онищенко Д.О., Панкратов С.А.** Моделирование теплового состояния крышки цилиндра и клапанов дизеля // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2013. № 4. С. 94—108.
8. **Биргер И.А., Иосилевич Г.Б.** Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.

D.O. Onishchenko, R.E. Budanov, N.S. Lozhkin

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF HEAT-STRESSED STATE CALCULATION FOR CYLINDER GEAD OF CHN21/21 DIESEL

УДК 536.24:538.4

А.Н. Палащенко, А.Я. Симоновский

Северо-Кавказский федеральный университет,
355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1

ТЕПЛООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ШАРА В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Описываются эксперименты по охлаждению нагретых до 500 °С намагничивающихся ферромагнитных шаров в приложенных магнитных полях разной интенсивности. С помощью термопар, как показано на рис. 1, измерялась температура в различных точках поверхности и внутри ферромагнитного шара. Охлаждаемый образец представлял собой шар диаметром 44 мм, выполненный из ферромагнитной стали. На поверхности шара устанавливались спаи хромель-копелевых термопар диаметром 0,5 мм, расположенных в точках экватора с азимутальными углами 0°, 30°, 60°, 90°.

На рис. 2 показана схема нагрева и охлаждения шара. Шар *1*, установленный на цилиндрической державке *2*, нагревался в электропечи *3* и по направляющим *4* быстро погружался в контейнер *5*, заполненный магнитной жидкостью, расположенный в полюсах электромагнита *6*. Запись показаний термопар осуществлялась при помощи осциллографа *7*.

Найдено, что наиболее интенсивное охлаждение происходит в окрестностях «полюсов» шара, где магнитная жидкость прижимается к поверхности шара силами давления. Наименьшая интенсивность охлаждения наблюдается в области «экватора», где силы, прижимающие жидкость к поверхности шара невелики, и поверхность отделена от жидкости достаточно толстым слоем пара.

Температурное поле восстанавливалось путем численного решения задачи теплопроводности о распределении температуры внутри шара. В качестве граничных условий использовались найденные в экспериментах значения температуры в шести точках поверхности шара и экстраполяции этих данных на другие точки поверхности.

Приведены графики распределения температуры внутри шара в зависимости от радиуса слоя шара r и азимутального угла θ. Найдено, что зависимость температуры от радиуса r за время охлаждения порядка 0,1 с быстро сглаживается и уже на расстоянии 1 мм от поверхности шара выходит на постоянную температуру, не зависящую от угла θ, при приближении к центру шара. Это подтверждается измерениями датчиков температуры, установленных внутри шара.

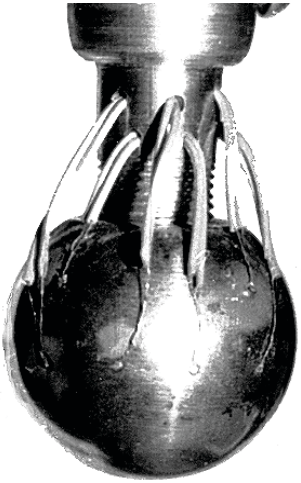


Рис. 1. Фотография шара с термопарами, размещенными на поверхности

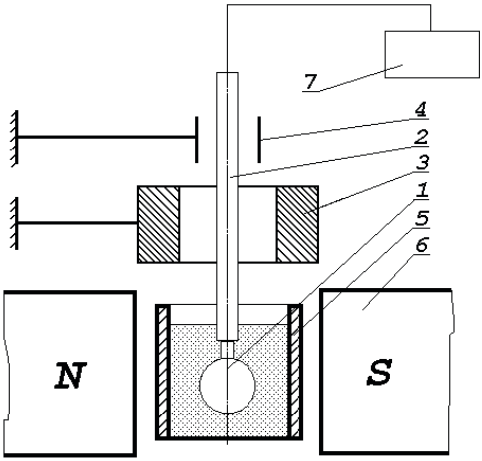


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: *1* — шар; *2* — немагнитный шток; *3* — электропечь; *4* — направляющие штока; *5* — контейнер с магнитной жидкостью; *6* — полюса электромагнита; *7* — осциллограф

Показано, что распределение температуры на поверхности шара неоднородно и существенно зависит от величины магнитного поля и расположения радиуса-вектора точек поверхности шара относительно направления вектора приложенного магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-01-00037)

A.N. Palashchenko, A.Ya. Simonovsky

North-Caucasus Federal University,
355009, Stavropol, Pushkina str., 1

HEAT TRANSFER AND HYDRODYNAMICS OF COOLING PROCESSES OF THE FERROMAGNETIC BALL IN A MAGNETIC FLUID

УДК 533.601.1: 536.244

Е.В. Панкратов, Ю.Л. Леухин*

Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова, Россия,
163002, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, 17

*e-mail: iarphen@gmail.com

ВЛИЯНИЕ УМЕНЬШЕНИЯ ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ КОЛЬЦЕВОГО КАНАЛА РЕКУПЕРАТОРА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ГОРЕЛКИ

Закрутка теплоносителя является эффективным способом тепловой защиты наиболее термически напряженных участков рекуперативных устройств. Используемые в системах отопления нагревательных печей рекуперативные горелки совмещают в одном корпусе камеру сгорания и рекуператор (рис. 1). При этом рекуператор горелки *4* — кольцевой канал между корпусом *1* и камерой сгорания *5* с одной стороны подключен к генератору закрутки *2*, выполненному в виде циклонной камеры. С другой стороны он сообщается с объемом камеры сгорания через завихритель *11* и кольцевую щель *12*. Отработанные продукты сгорания за счет инжекции струи, выходящей из сопла, и разряжения поступают во внешний дымовой канал *10*, нагревая воздух, идущий на горение, через стенку корпуса *1*. Недостатком рекуперативных горелок является их низкая эксплуатационная надежность из-за перегрева и разрушения наиболее термически напряженных участков стенки камеры сгорания и корпуса горелки, особенно вблизи ее выходного сопла. Как показывают исследования [1], теплоотдача обеих поверхностей кольцевого канала резко снижается по направлению движения закрученного потока от генератора закрутки, что уменьшает эффективность их охлаждения закрученным воздушным потоком. Для повышения эксплуатационной надежности рекуперативной горелки за счет интенсификации охлаждения наиболее термически напряженных участков было предложено ее корпус (внешний цилиндр кольцевого канала) выполнить в виде усеченного конуса, сужающегося в направлении сопла. Исследование аэродинамики и теплоот-

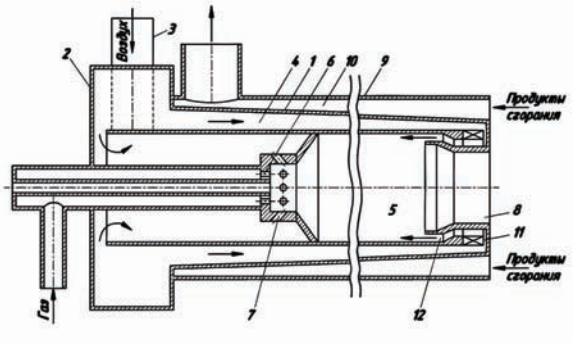


Рис. 1. Схематический чертеж рекуперативной горелки

дачи кольцевого канала конической формы выполнено численно с использованием программного комплекса Ansys Fluent. Расчеты хорошо согласуются с результатами физических экспериментов.

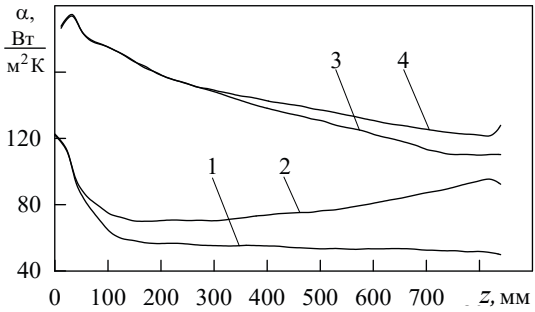


Рис. 2. Изменение α по длине внутренней (*1*, *2*) и внешней (*3*, *4*) поверхности кольцевого канала прямой (*1*, *3*) и конусной (*2*, *4*) форм

Геометрические размеры генератора закрутки приведены в [1]. Кольцевой канал имел длину, равную 840 мм, внутренний диаметр канала d_1 = 152 мм, а наружный d_2 линейно уменьшался от 184 до 164 мм, при этом площадь его поперечного сечения уменьшалась на 65 %. Выполнение внешнего цилиндра в виде сужающегося усеченного конуса приводит к возрастанию скорости потока и перестройке его при движении от генератора закрутки. Более упорядоченным в поперечном сечении становится расположение вторичных течений наподобие вихрей Тейлора—Гертлера, которые занимают все пространство кольцевого зазора, с осями, совпадающими с направлением основного закрученного потока. Коэффициенты теплоотдачи вблизи выходного сечения канала увеличиваются на внешней поверхности примерно на 11 %, а на внутренней (наиболее термически напряженной) на 86 % (рис. 2).

Литература

1. **Панкратов Е.В., Леухин Ю.Л., Тестова И.В.** Аэродинамика и теплоотдача продольно оребренного кольцевого канала с закрученным течением теплоносителя // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: 5-я Международная конференция (19—22 октября 2015): Труды конференции. Казань: КНИТУ – КАИ, 2015. С. 274—281.

E.V. Pankratov, Yu.L. Leukhin

Northern (Arctic) Federal University,
Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb., 17

INFLUENCE CONTRACTION OF CROSS-SECTIONAL AREA OF THE ANNULAR CHANNEL RECUPERATOR ON THE OPERATIONAL RELIABILITY OF RECUPERATIVE BURNER

УДК 536.27:662.987

Ю.Я. Печенегов, Ю.В. Першина

Энгельсский технологический институт (филиал)
Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.,
413100, г. Энгельс, пл. Свободы, 17

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ В ТРУБАХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Представлены результаты расчетов теплогидравлических характеристик потоков в трубах со вставленной скрученной лентой в широких диапазонах изменения чисел Рейнольдса Re и относительного шага закрутки *S*/*d* при постоянной площади поверхности теплообмена (длины труб).

Расчеты выполнялись с использованием модифицированных уравнений [1] для отношений коэффициентов теплоотдачи α/α_0 и гидравлического сопротивления ξ/ξ_0, где параметр без индекса соответствует трубе со вставленной скрученной лентой, а с индексом «0» — гладкой трубе без ленты. Отношения α/α_0 и ξ/ξ_0 определяли при равных для сравниваемых вариантов труб числах Re.

В качестве параметра, характеризующего эффективность интенсификации теплообмена путем закрутки потока, принимался коэффициент

$$\eta = (\alpha/\alpha_0)/(\xi/\xi_0) \ . \tag{1}$$

Определялись отношения тепловой мощности

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\alpha}{\alpha_0} \cdot \frac{1+\alpha_н/\alpha_0}{\alpha/\alpha_0 + \alpha_н/\alpha_0} \tag{2}$$

и гидравлического сопротивления

$$\Delta p/\Delta p_0 = \xi/\xi_0 \tag{3}$$

при неизменной для сравниваемых вариантов труб со скрученной лентой и без ленты площади поверхности теплообмена.

Из приведенных на рис. 1 результатов расчетов следует, что в области ламинарного режима движения с макровихрями ($Re < Re_{кр}$) величина η растет при увеличении Re и достигает максимума в области перехода к турбулентному режиму при $Re \approx Re_{кр}$. Для практических расчетов можно принимать, что максимальная величина η соответствует критическому числу Рейнольдса ($Re = Re_{кр}$), который определяется выражением [1]

$$Re_{кр} = 64000\left(\frac{2d}{S}\right)^{1,16} + 3780 \ . \tag{4}$$

При увеличении параметра S/d величина η возрастает и стремится к некоторому асимптотическому значению в области $S/d > 16$.

На отношение $(Q/Q_0)/(\Delta p/\Delta p_0)$ значительное влияние оказывает параметр $\alpha_н/\alpha_0$ (рис. 2). Наиболее благоприятное соотношение между Q/Q_0 и $\Delta p/\Delta p_0$ соответствует области $\alpha_н/\alpha_0 > 10$.

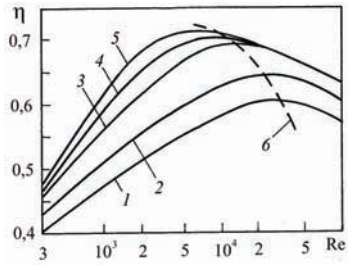


Рис. 1. Зависимость η от Re: *1 – S/d* = = 4; *2* — 6; *3* — 10; *4* — 16; *5* — 26; *6* — $Re_{кр}$ по формуле (4); *S* — шаг закрутки ленты, соответствует ее повороту на 180°; *d* — диаметр трубы

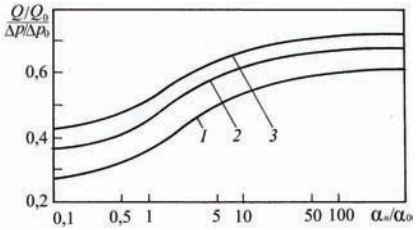


Рис. 2. Зависимость $(Q/Q_0)/(\Delta p/p_0)$ от $\alpha_н/\alpha_0$: Re = $Re_{кр}$; *1* — *S/d* = 4; *2* — 10; *3* — 26; $\alpha_н$ — коэффициент теплоотдачи снаружи трубы

Литература

1. **Дрейцер Г.А.** Эффективность использования закрутки потока для интенсификации теплообмена в трубчатых теплообменных аппаратах // Теплоэнергетика. 1997. № 11. С. 61—65.

Y.Y. Pechenegov, J.V. Pershina

Engels Technological Institute (branch) of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Russia, 413100, Engels, Svobody sq., 17

THERMAL-HUDRAULIC CHARACTERISTICS A SWIRLING FLOW IN THE PIPE HEAT EXCHANGER

УДК 621.039.6.536.24

Н.Ю. Пятницкая[1,2], *Е.В. Свиридов*[2], *Н.Г. Разуванов*[2]

[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

[2] Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДЪЕМНОГО И ОПУСКНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ В КОМПЛАНАРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Вводные замечания. Жидкие металлы (ЖМ) являются интересным объектом для изучения применительно к ядерной и термоядерной энергетике, например проект под названием ИТЭР [1,2]. В таких установках течение теплоносителя (ЖМ) происходит в сильных магнитных полях. При такой конфигурации определяющими факторами, влияющими на течение, оказываются магнитное поле (МП) и термогравитационная конвекция (ТГК). Эти факторы оказывают значительное влияние на характеристики гидродинамики и теплообмена. Настоящая работа направлена на исследование влияния этих факторов на течение ЖМ и обнаружение закономерностей, имеющих место при заданной конфигурации.

В данной работе приводятся экспериментальные данные, полученные на ртутном стенде ОИВТ РАН — МЭИ. Исследовалось опускное и подъемное течения ЖМ в прямоугольном канале в компланарном магнитном поле (МП) (российско-индийский проект охлаждения бланкета ИТЕР [1]). Компланарное отличается от поперечного МП тем, что направлено по длинной стороне сечения канала, а не по узкой. Следовательно, характер его влияния на течения должен значительно отличаться от характера влияния поперечного МП Эксперименты проводились при двух режимах обогрева (односторонний и двусторонний) со следующими режимными параметрами: $\mathrm{Re} = 10000 \div 50000$, $\mathrm{Ha} = 0 \div 800$, $q_c = 5000 \div 35000$ Вт/м^2 или $\mathrm{Gr}_q = 1{,}2 \cdot 10^8 \div 7 \cdot 10^8$.

Рабочий участок представляет собой канал прямоугольного сечения размером 17×56 мм, расположенный в зазоре между двумя полюсами электромагнита постоянного тока. Для осуществления различных режимов обогрева на двух сторонах канала смонтирован ленточный двухсекционный нагреватель, обеспечивающий двусторонний или односторонний обогрев. Для измерения температурных профилей в канале применяется рычажный зонд с измерительным датчиком.

На кафедре инженерной теплофизики в течение многих лет исследований были построены модели переноса импульса и тепла для течения ЖМ в продольном и поперечном МП [2]. Очевидно, что для моделирования течения в компланарном МП необходима такая же модель.

Для того чтобы снизить влияние ТГК и попытаться получить чистое влияние компланарного МП, в предыдущих экспериментах задавалось низкое значение теплового потока. Напротив, чтобы получить «чистое» влияние ТГК, была проведена серия экспериментов по исследованию подъемного течение ЖМ.

Сравнение полученных опытных данных представлено на рис. 1.

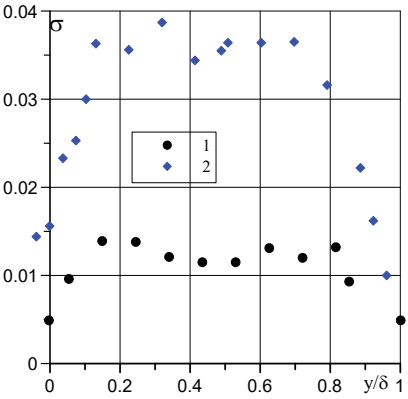


Рис 1. Профиль интенсивности температурных пульсаций. Re = 20000, Grq = 6·108, Ha = 500: *1* — подъемное течение; *2* — опускное течение

Необходимо предотвратить возможность развития описанных выше аварийных режимов. К счастью, аварийные режимы МГД-теплообмена возникают не всегда, а только при определенных соотношениях режимных критериев Re, Gr и Ha. Поэтому необходимо выявление «запрещенных диапазонов» или, точнее, «запрещенных соотношений» критериев Re, Gr, Ha, недопустимых при эксплуатации теплообменных систем токамака.

Работа проводится при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00866.

Литература

1. **Preliminary** design of Indian Test Blanket Module for ITER / E. Kumar et all. // Fusion Engineering and Design. 2008. № 83. P. 1169—1172..
2. **Генин Л.Г., Свиридов В.Г.** Аварийные режимы теплообмена в термоядерном реакторе // Теплофизика реакторов нового поколения. 6—9 октября 2015. Обнинск: ГНУ РФ-ФЭИ, 2015. С. 87—89.

N.Yu. Pyatnitskaya[1], *E.V. Sviridov*[2], *N.G. Razuvanov*[1]

[1]National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14
[2]Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya str., 13, Bldg. 2

INVESTIGATION OF UPWARD AND DOWNWARD FLOW OF LIQUID METAL IN RECTANGULAR DUCT AFFECTED BY COPLANAR MAGNETIC FIELD

УДК 536.242

С.Е. Спесивцев[1,2], *Ю.В. Люлин*[1,2]

[1]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
[2]Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗРЫВА ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ ТОЧЕЧНОГО НАГРЕВА СО СТОРОНЫ ПОДЛОЖКИ

Исследование теплоотвода от локального источника тепла становится в настоящее время одной из востребованных и сложнейших задач в теплофизике, поскольку прямым образом связано с проблемой охлаждения микроэлектронного оборудования. Одним из перспективных методов отвода высоких тепловых потоков от электронного оборудования являются технологии, использующие процессы с фазовым превращением, например испарение тонкого слоя жидкости. Динамика испарения и, соответственно, теплоотвод от источника теплоты существенным образом зависят от условий в тонком слое жидкости [1]. В частности, разрыв слоя за счет действия термокапиллярных сил и интенсивного испарения приводит к резкому ухудшению теплоотвода от локального источника тепла [2]. Целью данной работы является исследование динамики разрыва горизонтального испаряющегося слоя жидкости при нагреве от точечного источника тепла.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении, температуре и относительной влажности воздуха (28 ± 2) °С и (25 ± 3) % соответственно. Высота слоя жидкости изменялась от 300 до 700 мкм. В качестве рабочей жидкости использовался этанол. Диапазон температур нагревателя составлял 20—82 °С. Плотность теплового потока изменялась от 0 до 95 Вт/см^2 при диаметре нагревателя 1,6 мм. Визуализация и контроль слоя жидкости осуществлялись с помощью шлирен, теневого и конфокального методов.

Обнаружено, что разрыв слоя жидкости происходит в несколько этапов. Вначале происходит утончение слоя жидкости над областью локального нагрева за счет действия термокапиллярных сил и испарения. Дальнейшее утончение приводит к образованию остаточного слоя жидкости в области локального нагрева подложки, который испаряется до критической величины, и возникает разрыв слоя жидкости. После разрыва вся область локального нагрева интенсивно осушается и формируется круглое сухое пятно.

Изменение толщины слоя в центре подложки регистрируется с помощью конфокальной системы. Зависимость толщины слоя над областью нагрева от времени для различной начальной глубины слоя представлена на рис. 1. Критическая толщина остаточного слоя составляет менее 30 мкм. Обнару-

жено наличие пульсаций толщины слоя в области точечного нагрева перед формированием остаточного слоя. Обнаружено, что при увеличении толщины слоя жидкости плотность критического теплового потока увеличивается. Скорость формирования сухого пятна увеличивается с ростом толщины слоя и, соответственно, интенсивности локального нагрева. Одним из основных факторов, влияющих на разрыв остаточного слоя жидкости и формирование сухого пятна в области локального нагрева, является испарение.

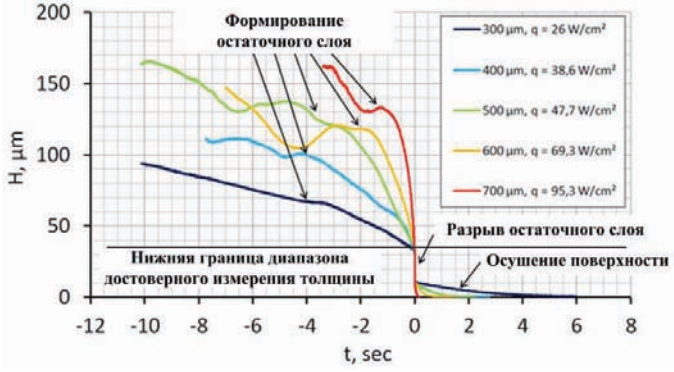


Рис. 1. Зависимость толщины слоя над областью нагрева от времени

Литература

1. **Fedorets A. A., Marchuk I.V. and Kabov O.A.** // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2013. Vol. 1. No 1. P. 51—62.
2. **Люлин Ю.В., Спесивцев С.Е., Марчук И.В., Кабов О.А.** // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 21. С. 22—29.

S.E. Spesivtsev[1,2], *Yu.V. Lyulin*[1,3]

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1
[2] Novosibirsk State University,
Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogov str., 2

EXPERIMENTAL STUDY OF BREAKDOWN DYNAMICS OF A THIN LIQUID LAYER WHEN HEATED LOCALLY FROM THE SUBSTRATE SIDE

УДК 536.248.2

В.С. Сердюков, А.С. Суртаев, А.Н. Чернявский

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИК-СЪЕМКИ

Пузырьковое кипение является одним из наиболее эффективных режимов отвода тепла и широко используется в различных технологических приложениях. Однако, несмотря на большое количество работ, опубликованных с середины прошлого века и посвященных изучению различных аспектов пузырькового кипения, многие вопросы остаются открытыми, а также отсутствует общепринятая теория процесса [1]. Это связано с тем, что кипение является очень сложным нестационарным процессом, требующим рассмотрения явлений, происходящих на различных масштабах. В частности, влияние испарения микрослоя жидкости толщиной несколько микрон в основании растущего парового пузыря на теплообмен до сих пор обсуждается в научном сообществе. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование локальных и интегральных характеристик теплообмена при кипении различных жидкостей с использованием современных экспериментальных методов, таких как высокоскоростные инфракрасная термография и видеосъемка.

В качестве рабочих жидкостей в экспериментах были использованы этиловый спирт и вода на линии насыщения при атмосферном давлении. Подробное описание экспериментальной установки и методик измерения представлено в [2]. В качестве нагревателя была использована проводящая пленка из оксида индия—олова (ITO), напыленная на сапфировую подложку. Разработанная в исследовании конструкция тепловыделяющего элемента позволила одновременно измерять нестационарное поле температур нижней стороны ITO пленки с помощью тепловизора и визуально регистрировать процесс роста и отрыва пузырей непосредственно на поверхности нагревателя с использованием видеокамеры.

Использование термографической съемки позволило в работе с высокой точностью измерить плотность активных центров парообразования. На основе полученных опытных данных была изучена зависимость плотности центров парообразования от степени перегрева тепловыделяющей поверхности и проведено сравнение с представленными в литературе расчетными моделями. Также были изучены временные характеристики и частота парообразования при кипении этилового спирта и воды при широком изменении тепловой нагрузки. С использованием данных высокоскоростной видео-

съемки была исследована динамика роста и отрыва паровых пузырей и динамика контактной линии в основании пузыря.

В работе также была проведена термографическая макросъемка, что позволило изучить эволюцию температурного поля под отдельными центрами парообразования с высоким разрешением (12,5 мкм). С использованием разработанного авторами численного алгоритма было построено распределение локальной плотности теплового потока под паровым пузырем (рис. 1). Подробное описание численного алгоритма представлено в [3]. Показано, что максимальный локальный тепловой поток наблюдается в области микрослоя и его величина в десятки раз превышает величину подводимого теплового потока. Оценки показали, что толщина микрослоя в процессе роста парового пузыря при кипении воды варьируется в диапазоне 1–5 мкм, что согласуется с опытными данными других авторов, полученными с использованием лазерной интерферометрии.

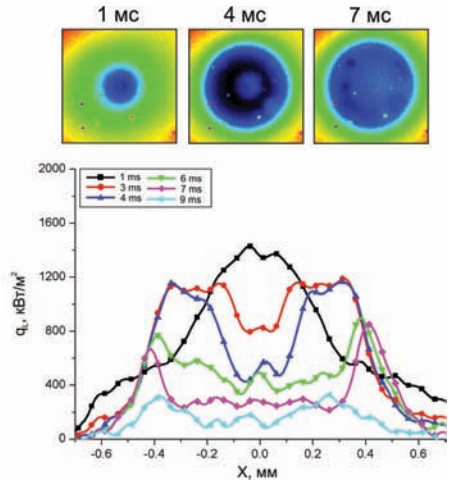


Рис. 1. Кадры эволюции температурного поля под отдельным пузырем при кипении воды и распределение локальной плотности теплового потока (q =50 кВт/м^2)

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-58-53099 ГФЕН_а).

Литература

1. **Ягов В.В.** Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях. М: Издательский дом МЭИ, 1994. 542 с.
2. **Суртаев А.С., Сердюков В.С., Моисеев М.И.** Применение высокоскоростной инфракрасной термографии для исследования кипения жидкости // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 4. С. 140—145.
3. **Surtaev A., Serdyukov V., Chernyavskiy A.** Study of thermal behavior of microlayer under vapour bubble at liquid boiling // EPJ Web of Conferences. 2017. *In press.*

V.S. Serdyukov, A.S. Surtaev, A.N. Chernyavskiy

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentiev ave., 1

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS AT POOL BOILING WITH THE USE OF IR-RECORDING

УДК 62-977

П.К. Ситкин, Р.В. Клейманов, А.В. Коршунов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: pavel.sitkin@bk.ru

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОДНОТОЧЕЧНЫЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ЗОНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ И УГЛА ПОТОКА

В настоящей работе предлагается конструкция одноточечного цилиндрического зонда для измерения полного давления, выполненного из керамики. В качестве прототипа была принята конструкция классического одноточечного цилиндрического зонда [1, 2]. Макет зонда выполнен из керамики с диаметром головной части 2,6 мм и диаметром приемного отверстия 0,3 мм. Подобная конструкция совместима с внутренним контуром водяного охлаждения, что позволяет достичь рабочих температур порядка 1000 ^{o}C и выше. Данная конструкция позволяет измерять переменные процессы с ограничением по частоте до ~3 кГц при температуре потока 300 К.

Литература

1. **Kupferschmied P., Gossweiler C., Gyarmathy G.** Aerodynamic Fast-Response Probe Measurement Systems // State of Development, Limitations and Future Trends: Materials of 12th Symposium on Measuring Techniques for Transonic and Supersonic Flows in Cascades and Turbomachines, Prague, Czech Republic, 1994.
2. **Tanaka K., Kalfas A.I. and Hodson H.P.** Development of Single Sensor Fast Response Pressure Probes // Proceedings of the XVth Bi-Annual Symposium on Measuring Techniques in Transonic and Supersonic Flows in Cascades and Turbomachines, 21—22 September. Florence, Italy.

P.K. Sitkin, R.V. Kleimanov, A.V. Korshunov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University ,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnichnichrskaya str., 29

HIGH-TEMPERATURE DIELECTRIC SINGLE-POINT CILINDRICAL PROBE FOR MEASUREMENT TOTAL PRESSURE AND FLOW ANGLE

УДК 532.696, 536.2.022

А.Н. Стерлягов[1]*, *М.Ю. Шлюпиков*[2]

[1]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 1
[2]Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),
630073, г. Новосибирск, просп. К.Маркса, 20
*e-mail: sterlyagov@itp.nsc.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДНО-СПИРТОВОГО РАСТВОРА МЕТОДОМ ИК-ТЕРМОГРАФИИ

Исследование процесса испарения капли жидкости является классической фундаментальной задачей, и ей посвящено большое количество работ. Однако в процессах, связанных с испарением капель, остается еще много принципиальных вопросов, требующих более глубокого изучения. Особенно это актуально для капель растворов в виду их широкого использования для различных практических приложений в энергетических установках [1, 2].

В работе выполнены экспериментальные исследования испарения капель водно-спиртового раствора различной концентрации. Эксперименты проводились для капель объемом 5 мкл, лежащих на пластине из тефлона при постоянной комнатной температуре и влажности воздуха (t = 24 °C, φ = 40 %).

В процессе испарения капель методом инфракрасной термографии определялось распределение температуры на поверхности капель в различные моменты времени. На основании полученных данных были определены временные зависимости изменения средних температур поверхности капель водно-спиртового раствора различной концентрации (рис. 1).

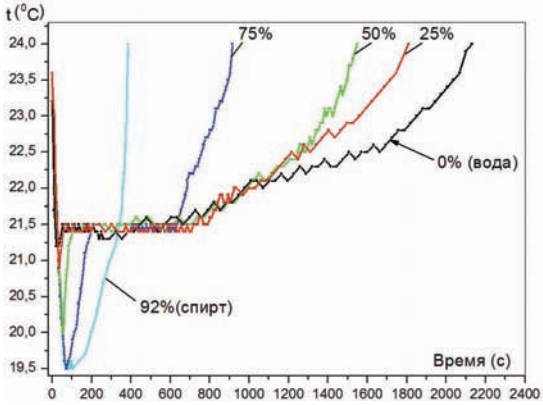


Рис. 1. Изменение средней температуры поверхности капель водно-спиртового раствора различной концентрации, лежащих на пластине из тефлона

Полученные зависимости наглядно показывают различия в динамике изменения температуры поверхности капель различной концентрации. В начальный период для всех капель температура резко снижалась. При этом температура капель спирта опускалась до более низких значений, чем температура капель воды, что связано с большей интенсивностью испарения спирта по сравнению с водой. В дальнейшем наблюдалось повышение температуры капель до их полного испарения. Для капель спирта характерно резкое повышение температуры, а для капель воды — более плавный рост температуры. В экспериментах наблюдалась следующая закономерность: в начальный момент температура капли раствора изменялась аналогично капле спирта, а затем аналогично капле воды. Очевидно, это обусловлено тем, что вначале преимущественно испаряется более летучий компонент раствора – спирт, а затем происходит испарение воды. Чем выше была концентрация спирта в капле, тем больше характер изменения температуры капли раствора соответствовал режиму испарения капли спирта. С помощью микрофотосъемки получены данные по динамике изменения геометрических параметров испаряющихся капель водно-спиртового раствора, которые хорошо согласуются с данными других исследователей для аналогичных условий [3].

В работе исследована динамика испарения капель водно-спиртового раствора различной концентрации. С помощью метода инфракрасной термографии впервые получены данные по изменению температуры поверхности испаряющихся капель водно-спиртового раствора с течением времени.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-00687.

Литература

1. **Kryukov A.P., Levashov V.Yu, Sazhin S.S.** Evaporation of diesel fuel droplets: Kinetic versus hydrodynamic models // Int. J. Heat Mass Transfer. 2004. № 47. P. 2541–2549.
2. **Zhang H.Q., Law C.K.** Effects of temporally varying liquid-phase mass diffusivity in multicomponent droplet gasification // Combust. Flame. 2008. № 153(4). P. 593–602.
3. **Sefiane K., Tadrist L., Douglas M.** Experimental study of evaporating water–ethanol mixture sessile drop: influence of concentration // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. № 46. P. 4527—4534.

A.N. Sterlyagov[1], *M.V. Shlupikov*[2]

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1
[2]Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, SB RAS
Russia, 630090, Novosibirsk, K. Marks ave., 20

INVESTIGATION OF EVAPORATION DROP OF WATER -ETHANOL SOLUTION BY IR THERMOGRAPHY

УДК 536.4; 539.213; 548.562

*А.С. Томин**

Институт теплофизики УрО РАН,
г. Екатеринбург, 620016, ул. Амундсена, 107А
*e-mail: andrey.itf.2017@yandex.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ГИДРАТА МЕТАНА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОНДЕНСАЦИЕЙ СВЕРХЗВУКОВЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ

Интерес к газовым гидратам обусловлен существованием огромных запасов углеводородного сырья на Земле в газогидратном виде и перспективой его использования как источника топлива, возможностью хранения и транспортировки газа в газогидратном состоянии, влиянием природных газовых гидратов на климат планеты [1]. Важное место в решении прикладных задач, связанных с газовыми гидратами, занимают усилия, направленные на предупреждение и ликвидацию техногенного гидратообразования в газодобывающем и газоперекачивающем оборудовании. В качестве метода утилизации парниковых газов предлагается перевод их в газогидратную форму и захоронение на дне мирового океана.

Аморфные конденсаты смеси вода-метан получали в вакуумном криостате осаждением сверхзвуковых молекулярных пучков на охлажденную жидким азотом подложку. При последующем нагревании образца происходит его стеклование (переход из твердого аморфного состояния в жидкое вязкотекучее) и последующая спонтанная кристаллизация, которая может привести к образованию гидрата метана.

Для наблюдения за образцом использовался емкостный датчик, закрепленный на подложке и представляющий из себя пленочный конденсатор. В опыте наблюдали изменение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь образца, осажденного на поверхность датчика. Температура образца при осаждении не превышала 65 К благодаря откачке паров жидкого азота, охлаждающего подложку. По изменению диэлектрических свойств образца судили о превращениях в нем. Тепловые эффекты, связанные с кристаллизацией аморфного образца, регистрировали дифференциальной термопарой. Погрешность температур стеклования T_g и кристаллизации T_c не превышала 1 К. Массовую долю метана в гидрате определяли при извлечении образца из вакуумной камеры. Погрешность определения массовой доли не превышала 3 % [2].

Для оптимизации динамики молекулярных пучков были использованы сопла Лаваля, позволяющие получать сверхзвуковые скорости и охлаждать молекулярные потоки благодаря их адиабатическому расширению. Результаты опытов показали, что сверхзвуковое осаждение позволяет достигать более высокое содержание газа по сравнению с неоптимизированным методом. В перспективе метод может быть использован при получении гидрата

водорода для решения проблемы его хранения и транспорта в связи с развитием водородной энергетики.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-02734) и Программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 15-1-2-7).

Список литературы

1. Sloan E.D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates // Nature (London) 2003. № 426. P. 353–359.
2. Faizullin M.Z., Vinogradov A.V., Koverda V.P. Formation of clathrate hydrates under crystallization of gas-saturated amorphous ice // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. V. 65. P. 649–654.

A.S. Tomin

Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 620016, Yekaterinburg, Amundcena st., 107A

OBTAINING HYDRATE METHANE BY LOW-TEMPERATURE CONDENSATION OF SUPERSONIC MOLECULAR BEAMS

УДК 536.24

З.З. Хажиев[1,2], *В.В. Леманов*[1]*

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
*e-mail: lemanov@itp.nsc.ru

СРЕДНИЕ И ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА В ИМПАКТНОЙ КРУГЛОЙ СТРУЕ

Импактные струи широко используются для эффективного охлаждения теплонапряженных устройств в энергетике и микроэлектронике. Известно, что теплоотдача в импактных струях зависит от числа Рейнольдса ($\mathrm{Re} = ud/\nu$), расстояния от сопла до поверхности (h/d) и др. [1]. Недавно была обнаружена зависимость теплоотдачи от вида струйного источника (сопла или трубки) [2]. Для теплонапряженных участков важно знать не только средние, но и пиковые (максимальные) значения теплового потока.

В настоящей работе представлено экспериментальное исследование средних и пульсационных тепловых характеристик в лобовой точке круглой импактной струи воздуха при низких числах Рейнольдса ($\mathrm{Re} < 20000$). В опытах измерены средние и пульсационные значения теплового потока, коэффициента теплоотдачи и числа Нуссельта.

Теплообменный участок выполнен в виде медной пластины диаметром 190 мм и толщиной 50 мм. Подогрев пластины осуществлялся с помощью электрического нагревателя, при этом обеспечивалось граничное условие $T_w = \mathrm{const}$ ($T_w = 50$—60 °C). Миниатюрный датчик теплового потока (ДТП) размером 2×2 мм установлен заподлицо в лобовой точке пластины. ДТП через предварительный усилитель и АЦП подсоединен к автоматизированной системе сбора информации. Такая схема позволяет измерять мгновенное значение теплового потока в полосе частот до 3 кГц и вычислять по временному ряду (размер выборки 20 000) среднее Q и среднеквадратичное q значения теплового потока. Опыты по теплообмену проведены для двух вариантов струйного источника: 1) трубка диаметром d = 3,2 мм и длиной $L/d = 100$,

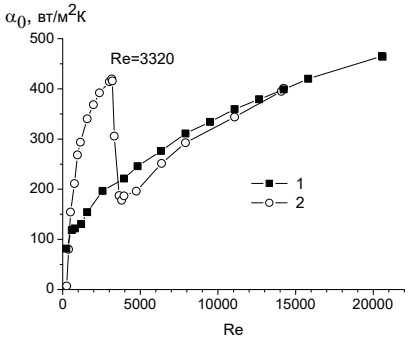


Рис. 1. Среднее значение коэффициента теплоотдачи в лобовой точке пластины: *1* — сопло, *2* — трубка

2) профилированное сопло d = 3,2 мм; при одинаковом расстоянии от источника до пластины h/d = 20.

Данные для среднего значения коэффициента теплоотдачи в лобовой точке плоской пластины представлены на рис. 1. Здесь изображены опыты для струи, истекающей из сопла и трубки. Из рисунка видно, что теплообмен для струи, распространяющейся из сопла, имеет монотонный рост с увеличением числа Рейнольдса. Для истечения из трубки наблюдается немонотонное поведение теплоотдачи с максимумом при Re = 3320. Измерения пульсации коэффициента теплоотдачи демонстрируют: а) низкие значения для истечения из сопла во всем диапазоне чисел Re, б) максимум пульсаций при Re = 3320 для истечения из трубки. Монотонный рост теплоотдачи для струи, вытекающей из сопла, соответствует расчетам [1]. Немонотонное поведение теплоотдачи при увеличении Re для истечения из трубки связано с процессом ламинарно-турбулентного перехода в трубке. При Re<3320 течение ламинарное и теплоотдача растет, в области перехода теплообмен резко падает, а затем при наличии турбулентного режима в трубке растет. Наши опыты [3] также демонстрируют сильное влияние начального распределения скорости на характеристики распространения струи.

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ (грант ОНГ № 14-19-00402п) и РФФИ (грант № 17-08-00958).

Литература

1. **Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К.** Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. М.: Машиностроение, 1977. 248 с.
2. **Леманов В.В., Терехов В.И.** Особенности теплообмена в лобовой точке импактной осесимметричной струи при малых числах Рейнольдса // ТВТ. 2016. Т. 54. № 3. С. 482—484.
3. **Леманов В.В., Терехов В.И., Шаров К.А., Шумейко А.А.** Экспериментальное исследование затопленных струй при низких числах Рейнольдса // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 9. С. 34—40.

Z.Z. Hajiev [1,2], *V.V. Lemanov* [1]

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1
[2] Novosibirsk State Technical University,
630073, Novosibirsk, K. Marks ave., 20

AVERAGE AND PULSATION PARAMETERS OF HEAT TRANSFER IN THE IMPINGING ROUND JET

УДК 536.242; 621.03

Ю.И. Шанин[1]*, *А.В. Черных*[1], *И.С. Шарапов*[1,2]

[1]ФГУП «Научно-исследовательский институт НПО «ЛУЧ»,
142100, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24

[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское шоссе, 31

*e-mail: syi@luch.podolsk.ru

ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ В ЛАЗЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

Покрытия в оптике используются как для повышения коэффициента зеркального отражения (КЗО) $R_{КЗО}$, так и для защиты от механических повреждений. Сегодня разработка многослойных четвертьволновых интерференционных диэлектрических покрытий на основе двуокиси кремния и пятиокиси тантала, либо зеркальных покрытий позволяет получать КЗО на уровне $R_{КЗО}$ = 99,9—99,98 %. Работоспособность оптических элементов определяется качеством покрытий, их лучевой стойкостью. Уже на стадии нанесения покрытий и при их контроле необходимо учитывать предельно допустимые размеры дефектов, превышение которых приводит к их деградации и разрушению.

Возможные дефекты на зеркальной поверхности приводят к локальным всплескам температуры из-за местного увеличения поглощения энергии. В этой области возможны локальное вспучивание, концентрация термонапряжений и даже оплавление материала. В работе проведен анализ термонапряженного состояния оптических элементов (зеркал, проходных окон, светоделителей и пр.) – температурных полей, напряжений, изгибных термоперемещений и расширений оптической поверхности при различных дефектах оптических элементов и воздействии локально неоднородного лазерного излучения.

Рассмотрено решение нестационарных задач о теплонапряженном состоянии неохлаждаемых оптических элементов при наличии на их поверхности «грязных» пятен, царапин, нарушений контакта и отслоений покрытия. Для определения критического размера дефекта применялись различные критерии [1]: 1) температурный, 2) прочностной, 3) термодеформационный.

Для анализа и проведения расчетов применялась тепловая модель термомеханики полупространства при локальном нагреве осесимметричной лучевой нагрузкой [1, 2].

Полученные аналитические решения позволяют установить предельные размеры дефектов (при нарушении чистоты, сплошности контакта, наличии царапин) при достижении: а) какой-либо критической температуры; б) раз-

решенных термоперемещений оптической поверхности; 3) напряжений, достаточных для появления пластического течения материала.

Для охлаждаемых лазерных зеркал дефекты в системе охлаждения по своим последствиям являются наиболее опасными, поскольку вызываемые ими нарушения теплообмена приводят к снижению эксплуатационных характеристик зеркал вплоть до их разрушения. Для таких задач рассмотрены два особенных случая: а) наличие дефекта в системе охлаждения и б) присутствие в мощном лазерном излучении локальных пиков большой интенсивности.

При рассмотрении дефекта системы охлаждения она рассматривалась в упрощенной постановке как сток тепла, расположенный на определенной толщине зеркала. Зеркало в виде двумерной полосы нагревалось постоянным тепловым потоком. Дефект имитировался отрезком, на котором стоки тепла отсутствовали. При такой постановке получено решение для двумерного стационарного температурного поля [1]. Мы проанализировали его для максимальной температуры на поверхности зеркала в той точке, под которой находился центр дефекта. С точки зрения минимизации воздействия дефекта оптимальной является система охлаждения, максимально приближенная к оптической поверхности зеркала.

По своему воздействию на зеркала неоднородность лазерного излучения (например, пики, на порядок превышающие среднюю интенсивность) аналогична дефектам оптической поверхности.

Таким образом, в работе для анализа теплового, прочностного и термодеформационного состояния оптических элементов с различными дефектами и находящихся под воздействием различного вида лазерной нагрузки предложены простые аналитические зависимости и с их помощью проведены некоторые расчетные оценки.

Литература

1. **Власов Н.М., Колесов В.С., Федик И.И.** Стабильность оптической поверхности лазерных зеркал. М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2005.
2. **Шанин О.И., Черных А.В., Шанин Ю.И., Шарапов И.С.** Исследование термонапряженного состояния лазерных проходных лейкосапфировых окон // Тепловые процессы в технике. 2015. № 9. С. 423—432.

Yu.I. Shanin[1], *A.V. Tchernych*[1], *I.S. Sharapov*[1,2]

[1]FSUE «SRI SIA «LUCH», 142100, Russia, 142100, Podolsk, Zheleznodorozhnaya, 24

[2]National Nuclear Research University «MEPHI»,
Moscow, 115409, Kashirskoye sh., 31

THERMODEFORMATION SIZE RESTRICTIONS OF DEFECTS IN LASER OPTICAL ELEMENTS

УДК 532.6

А.А. Шебелева[1,2]*, *А.В. Минаков*[1,2], *А.А. Ягодницына*[2,3], *А.В. Ковалёв*[2,3], *А.В. Бильский*[2,3]

[1] Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
[3] Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
*e-mail: an_riv@mail.ru

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ СМЕСИ КАСТОРОВОГО И ПАРАФИНОВОГО МАСЕЛ В МИКРОКАНАЛЕ Т-ТИПА

Проведено расчетно-экспериментальное исследование режимов двухкомпонентного жидкостного течения смеси касторового и парафинового масел в микроканале Т-типа с поперечными размерами канала 200×400 мкм. Расчетно-экспериментальные исследования проводились в широких диапазонах расходов, что обеспечило широкий диапазон чисел Рейнольдса от $2{,}1\cdot10^{-5}$ до 0,1, чисел Вебера от $1{,}7\cdot10^{-9}$ до 0,01 и капиллярного числа от $8\cdot10^{-5}$ до 1,16.

Для моделирования двухфазных течений в микроканале Т-типа использовалась численная методика, основанная на методе жидкости в ячейках (VOF), которая хорошо зарекомендовала себя для расчета двухфазных течений в микроканалах. Суть этого метода состоит в том, что жидкости рассматриваются как единая двухкомпонентная среда и пространственное распределение фаз, в пределах расчетной области, определяется при помощи специальной функции маркера, которая задает объемную долю жидкой фазы в расчетной ячейке. Для моделирования поверхностного натяжения в рамках VOF метода использовался CSF алгоритм. В качестве моделей динамического контактного угла на данном этапе использовалась квазидинамическая модель, которая предполагает переключение между наступающим и отступающим значениями краевого угла в зависимости от знака скорости контактной линии.

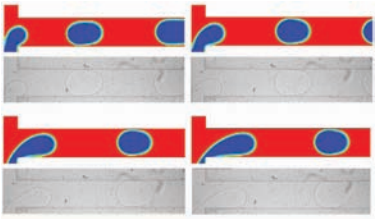


Рис. 1. Сравнение расчета и эксперимента для снарядного режима (Q_c = 0,1 мкл/мин, Q_p = 0,05 мкл/мин)

Расчеты проведены в пространственной и нестационарной постановке. В ходе исследований были получены следующие режимы течения смеси парафи-

нового и касторового масел: параллельный, Plug, Slug и капельный. Сравнение расчетной и экспериментальной форм границы раздела жидких сред для одного режима течения показано на рис. 1. В результате тестирования было показано, что для всех рассмотренных вариантов расходов жидкостей расчет хорошо воспроизводит наблюдаемые в эксперименте режимы течения.

Подробно был изучен снарядный режим течения этой смеси. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными фотографиями. Установлено хорошее качественное и количественное согласие экспериментальных фотографий и результатов моделирования не только на этапе движения отдельных снарядов, но, что наиболее важно, на этапе их формирования. Формы границ раздела сред в сходные моменты времени в расчете и эксперименте очень хорошо согласуются, что говорит о хорошей разрешающей способности расчетного алгоритма. Сравнение расчета и эксперимента по длине снаряда показало, что расхождение расчета и эксперимента не превышает 5 %.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10519).

Литература

1. **Guzei D.V., Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Dekterev A.A**. Numerical modeling of gas-liquid flows in mini- and microchannels // Thermophysics and Aeromechanics. 2015. 22 (1). P. 61—71.

A.A. Shebeleva[1,2], *A.V. Minakov*[1,2], *A.A. Yagodnitsyna*[2,3], *A.V. Kovalev*[2,3], *A.V. Bilsky*[2,3]

[1] Siberian Federal University,
Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny ave., 79
[2] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev Ave., 1
[3] Novosibirsk State University,
Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW REGIMES OF MIXTURE OF CASTOR AND PARAFFIN OILS IN A T-TYPE MICROCHANNEL

Секция 5



Прикладные проблемы тепло- и массообмена в перспективных энергетических установках

УДК 621.039.533.6

К.В. Агапов[1], *Д.О. Дуников*[2]

[1]Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14
[2]Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, ул. Красноказарменная, 17А

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

В условиях отсутствия или невозможности подключения к электросети задача по энергоснабжению объекта является актуальной на сегодняшний день. Недостатком аккумуляторов является необходимость периодичной подзарядки для поддержания емкости батареи, которая уменьшается даже в том случае, когда гальванический элемент не был в эксплуатации. Поэтому решением данных проблем является создание автономных устройств на основе топливных элементов. Это позволяет решить проблему с мощностью, так как она определяется геометрией и типом топливного элемента, решить проблему с емкостью, время работы определяется количеством запасенного топлива.

Для работы ТЭ необходимы два реагента: топливо, подающееся на анод, обычно это водород или углеводородные газы и окислитель, подающийся на катод, им является кислород вместе с воздухом. Анод и катод разделены между собой электролитом, в ТПТЭ это протон-проводящая полимерная мембрана. Свойства мембраны определяют и саму работу ТЭ, например, напряжение разомкнутой цепи, поляризацию. Для формирования батареи мембранно-электродные блоки соединяются последовательно при помощи биполярных пластин. Положительный и отрицательный электроды состоят из двух слоев. Газодиффузионный слой представляет из себя углеродную бумагу или углеродную ткань. Каталитический слой содержит углерод с наночастицами платины, пропитанный раствором иономера для увеличения протонной проводимости.

Количество используемой платины в ТЭ стараются уменьшить, в настоящее время средним значением является 0,4 мг/см^2, либо используются сплавы с другими элементами, такими как палладий — Pt-Pd/C, кобальт — Pt-Co/C, рутений — Pt-Ru/C и другие.

В результате химической реакции протоны диффундируют через мембрану, электроны идут во внешнюю цепь, и генерируется электрическая энергия, тепло. Преимущество ТЭ в сравнении с традиционными источниками энергии заключается в том, что они имеют КПД порядка 40—60 %, меньшие вредные выбросы в атмосферу, практически полное отсутствие показателей шума и вибрации.

K.V. Agapov[1], *D.O. Dunikov*[2]

[1]National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya srt., 14
[2]Joint Institute for High Temperatures,
Russia, 111116, Moscow, Krasnokazarmennaya str, 17A

FUEL CELLS IN ENERGY SECTOR

УДК 621.181

Н.Д. Агафонова, М.Ю. Егоров, И.Л. Парамонова, В.В. Сергеев, Е.Д. Федорович*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: egorov12m2u@mail.ru

СРАВНЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ АЭС С ВВЭР

Введение. В современных парогенераторах (ПГ) насыщенного водяного пара АЭС с ВВЭР осуществляются сложные рабочие процессы: передача теплоты от греющего реакторного теплоносителя к нагреваемой и испаряемой воде II контура, многократная естественная циркуляция (МЕЦ) пароводяной смеси в межтрубном пространстве аппарата, сепарация — отделение воды от пара, направляемого из ПГ в паровую турбину. Не является простой и эксплуатация ПГ — значительная часть остановов АЭС вызывается неполадками в ПГ. Современные ПГ — крупногабаритные аппараты. При четырехпетлевой компоновке отечественных ядерных паропроизводящих установок (ЯППУ) с ВВЭР-1000 оборудование I контура занимает значительную площадь под защитной оболочкой реакторной установки.

В отечественной атомной энергетике с ВВЭР получили исключительное распространение горизонтальные ПГ (ГПГ). ПГ, разработанные за рубежом для блоков с PWR, как правило, вертикальные. Опыт эксплуатации обоих типов ПГ выявил их достоинства и недостатки. Дискуссии по выбору пути развития отечественного парогенераторостроения АЭС с ВВЭР не прекращаются [1]. Это свидетельствует об актуальности и сложности выбора ПГ.

Горизонтальные ПГ. В процессе эксплуатации проявились недостатки:

- небольшая, ограниченная диаметром корпуса, высота контуров МЕЦ; это означает, что движущие напоры ЕЦ малы и малы скорости пароводяной смеси, что ограничивает паропроизводительность аппарата, ухудшает продуваемость межтрубных зазоров, способствуя накоплению в застойных областях продуктов коррозии рабочего тела («шлама»);
- малый запас по уровню воды (расстояние между верхними рядами теплообменных труб и уровнем ~0,5 м); т.е. при колебаниях уровня возможно «оголение» верхних рядов труб, прекращение охлаждения теплоносителя в них, нестационарный локальный перегрев металла «холодного» коллектора греющего теплоносителя (термоциклические повреждения);
- появление и развитие трещин в коллекторах; это явилось причиной массовой замены ГПГ на АЭС РФ [2].

Четырехпетлевая схема I контура ЯППУ с ВВЭР-1000(1200) является вынужденной, так как при условии транспортировки по железной дороге ГПГ имеют небольшую предельную единичную мощность 250—270 МВт (эл.).

Вертикальные ПГ. Зарубежные ВПГ прошли сложный путь освоения, некоторые трудности (виброизнос трубных пучков под действием пароводяной смеси) не преодолены. Недостатки («дентинг») привели к замене более 300 ПГ на зарубежных АЭС. Большие, чем для ГПГ, единичные мощности ВПГ (до 500—600 МВт (эл.)) позволяют реализовать ЯППУ в трех- и двухпетлевом варианте. Это сокращает металлоемкость оборудования I контура. Тяговая высота контуров МЕЦ в ВПГ больше, чем в ГПГ (~10 м вместо ~2,5 м), что способствует интенсификации тепломассообменных процессов (кипение, перемешивание водяной и паровой фаз). Сегодня в РФ ВПГ существуют в проектах [3]. В ВПГ можно организовать выделенный экономайзерный участок для увеличения среднего температурного напора между средами и давления вырабатываемого пара, что повысит эффективность термодинамического цикла АЭС [4]. Для ВПГ-250 НПО ЦКТИ, ЗИОМАР, ВТИ, ВНИИАМ, ПО «Ижорский завод» выполнен расчетно-экспериментальный комплекс работ [4], подтвердивший эффективность рабочих процессов.

Выводы. Эксплуатируемые сегодня на АЭС с ВВЭР (PWR) ГПГ и ВПГ имеют неустранимые недостатки в конструкции и организации рабочих процессов. Учитывая их опыт эксплуатации, целесообразна разработка нового отечественного проекта ВПГ и создание его опытного образца для определения перспектив развития этого направления парогенераторостроения.

Литература

1. **Харченко С.А., Лахов Д.А.** О предельной мощности ГПГ // Материалы 16-й научн.-техн. конф. Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2014.
2. **Несущая** способность ПГ ВВЭР / Н.А. Махутов и др. М.: Наука, 2003. 439 с.
3. **Судаков А.В., Силин В.В., Лебедев М.Е.** Перспективы создания ВПГ с ширмовой поверхностью нагрева для современных АЭС с реакторами типа ВВЭР // Теория и практика современных наук.: Материалы VI Межд. научн.-практ. конф. М., 2012. С. 137—145.
4. **Кругликов П.А.** Выбор параметров тепловых схем АЭС с водоохлаждаемыми реакторами с учетом режимных факторов и требований унификации: Автореф. дисс. … канд. техн. наук. Л., 1985. 22 с.

N.D. Agafonova, M.Yu. Egorov, I.L. Paramonova, V.V. Sergeev, E.D. Fedorovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

COMPARISON OF WORKING PROCESS PECULIARITIES IN HORIZONTAL AND VERTICAL STEAM GENERATORS AT NPP PWR

УДК 621.565.93

*П.Л. Аксенов, М.Ю. Егоров**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: egorov12m2u@mail.ru

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ПАРОГЕНЕРАТОРЕ ПГВ-1000В АЭС

Введение. Интенсификация теплообмена (ТО) изучается и успешно применяется на протяжении более 300 лет [1]. В атомной энергетике интенсификация ТО применима для реакторов, парогенераторов (ПГ), сепараторов-перегревателей [2, 3] турбин и другого оборудования.

В докладе рассмотрены способы интенсификации ТО, представлена их классификация. Выполнен тепловой расчет ПГВ-1000 с интенсификацией ТО при помощи периодических кольцевых выступов. Расчет основан на нормативном методе теплогидравлического расчета ПГ. Проведен сравнительный анализ результатов без и с интенсификацией теплообмена.

Парогенератор ПГВ-1000 — рекуперативный теплообменный аппарат с погруженной поверхностью теплообмена из горизонтально расположенных U-образных теплообменных змеевиков.

Рассмотрим интенсификацию методом организации периодических кольцевых выступов [4] (рис. 1). Особенностью такого способа интенсификации является то, что при его использовании не увеличивается внешний диаметр труб. Это позволяет использовать данные трубы в тесных пучках без изменения технологии сборки аппарата. Канавки и кольцевые диафрагмы турбулизируют поток в пристенном слое, обеспечивая интенсификацию ТО снаружи и внутри труб. Для капельных жидкостей при значениях критерия Рейнольдса, лежащих в диапазоне $Re = 10^4—4\cdot10^5$, получена следующая зависимость [5]:

$$Nu/Nu_{ГЛ} = [100\cdot(1 - d/D)]^{0,445},$$

где $Nu_{ГЛ} = 0,0216\cdot Re^{0,8}\cdot Pr^{0,445}$; d — диаметр канала в области выступа; D — диаметр изначального канала; t — расстояние между центрами выступов.

Выводы.

1. Выполнены варианты теплового расчета ПГВ-1000 как без применения интенсификации, так и с применением интенсификаторов в виде периодических кольцевых выступов.

2. Применение интенсифицированной поверхности ТО парогенератора ПГВ-1000 обеспечивает увеличение интенсивности теплоотдачи на 8 % [6].

3. Главный циркуляционный насос (ГЦНА) в реакторной установке необходим для создания циркуляции теплоносителя. При добавлении в каналы труб кольцевых выступов повысится гидравлическое сопротивление, а

следовательно, необходимо повышение мощности ГЦНА. Эмпирически определено, что гидравлическое сопротивление зависит от показателей d/D и t/D. Так, при $d/D = 0{,}94$ и $t/D = 5$ мощность ГЦНА необходимо увеличить на 40 % первоначальной.

4. Для снижения дополнительной мощности ГЦНА предложено использовать нанесение кольцевых выступов не по всей длине трубы, а только на участке, что снизит гидравлическое сопротивление труб.

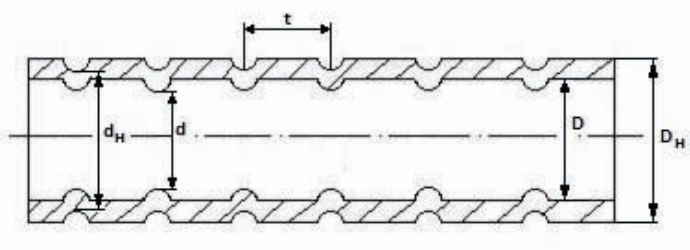


Рис. 1. Продольный разрез трубы с кольцевой накаткой

Литература

1. **Попов И.А., Махянов Х.М., Гуреев В.М.** Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань, 2009. 560 с.
2. **Егоров М.Ю.** Процессы теплообмена и гидродинамики в змеевиковом промежуточном перегревателе влажнопаровых турбин АЭС // Сборник трудов научно-технической конференции «Команда-2010». СПб.: СПбАЭП, 2010. С. 4–6.
3. **Problems** of thermohydraulic design methods of intermediate separators-reheaters for NPP turbines modernization with account of their long time operation experience / M. Gotovsky, M. Egorov, V. Mikhailov et al. // Proceedings of 6th Baltic Heat Transfer Conference, Tampere, Finland, 2011. 21 p.
4. **Калинин Э.К., Дрейцер Г.А.** Эффективные поверхности теплообмена. М: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
5. **Кишкин А.А., Краев М.В.** Интенсификация теплообмена // Вестник Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. ак. М.Ф. Решетнева. 2005. № 3. С. 130—138.
6. **Аксенов П.Л., Егоров М.Ю.** Интенсификация теплообмена в оборудовании АЭС // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. Ч. 1. С. 82—84.

P.L. Aksenov, M.Yu. Egorov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

HEATTRANSFER ENHANCEMENT IN THE STEAM GENERATOR PGV-1000V NPP

УДК 621.175

П.А. Ананьев[1], *С.Н. Ленев*[2], *П.В. Голов*[2],
А.Ю. Картуесова[1], *Д.В. Брдынкевич*[1]

[1]ЗАО «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон»,
248010, г. Калуга, ул. Комсомольская Роща, 43
[2]ПАО «Мосэнерго»,
119526, Москва, просп. Вернадского, 101, корп. 3

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВОЗДУШНО-КОНДЕНСАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ВЫСОКИХ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗКАХ С ИСПЫТАНИЕМ УСТРОЙСТВА ПОЛЕЗНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА

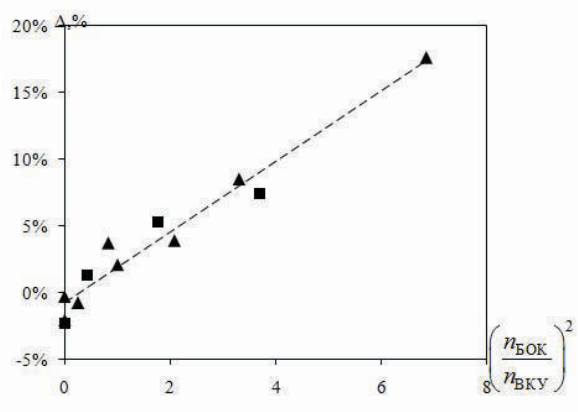
В настоящее время в энергетике активно эксплуатируются воздушно-конденсационные установки (ВКУ) [1, 2]. Экспериментальные исследования и расчеты макетов ВКУ и обследование эксплуатирующихся установок, показали, что негативное влияние на главную характеристику ВКУ — коэффициент теплопередачи — оказывают ветровые потоки высокой скорости, которые затрудняют работу вентиляторных установок.

Целью данной работы являлось проведение экспериментальных исследований устройств полезного использования энергии ветра на макете воздушно-конденсационной установки (ВКУ).

Для экспериментальных исследований были выбраны конструкции устройства полезного использования ветра, устанавливаемые на входе в цирктрассу ВКУ, в виде наклонной плоскости и в виде вертикального ряда наклонных экранов; для создания ветрового потока использовался боковой вентилятор. Дополнительно были проведены экспериментальные исследования макета с установленным верхним направляющим устройством на выходе из вентилятора ВКУ. Верхнее направляющие устройство имеет конструкцию из восьми лопаток, установленных по направлению вращения вентилятора с возможностью изменения угла их раскрытия: 0°, 15° и 30°.

На рис. 1 приведен график зависимости увеличения объемного расхода Δ от квадрата отношений частот вращения бокового вентилятора и вентилятора макета для 1-го варианта устройства полезного использования энергии ветра. Как видно из графика, объемный расход увеличился на 4—18 %.

Для 2-го варианта получены результаты, показавшие при высоких скоростях вращения вентилятора ВКУ и бокового вентилятора отрицательный прирост средней скорости, что требует более тщательного изучения работы данной конфигурации экспериментального стенда.



$n_{ВКУ}$: ◆ – 550 , ■ – 750 , ▲ – 1000

Рис. 1. Зависимость увеличения объемного расхода Δ от квадрата отношений частот вращения бокового вентилятора и вентилятора макета для 1-го варианта устройства полезного использования энергии ветра

Наилучший результат экспериментальных исследований макета ВКУ с установленным верхним направляющим устройством получен с безлопаточной цилиндрической конструкцией, когда лопатки направляющего устройства располагались с геометрическим углом входа 0°. При наличии ветра в этом варианте разрежение на выходном сечении вентилятора составляет 102,7 Па, при безветрии — 72 Па, при этом разрежение без устройства при ветре 10 м/с составило 61 Па, при отсутствии ветра — 41 Па. Для остальных вариантов конструкции разрежение при ветре и без него оказалось меньше, чем в варианте без устройств.

Литература

1. **Мильман О.О., Федоров В.А.** Воздушно-конденсационные установки. М.: Издательство МЭИ, 2002. 208 с.
2. **Федоров В.А., Мильман О.О.** Конденсаторы паротурбинных установок. М.: Издательство МЭИ, 2013. 560 с.

P.A. Ananev[1]*, S. N. Lenev*[2]*, P.V. Golov*[2]*, A.Y. Kartuesova*[1]*, D.V. Brdinkevich*[1]

[1]Joint Stock Scientific Production Company «Turbocon»,
Russia, 248010, Kaluga, Komsomolskaya Roscha str., 43
[2]PJSC «Mosenergo»,
119526, Moscow, Vernadskiy ave., 101, Bldg. 3

CALCULATION AND EXPERIMENTAL RESEARCH EFFICIENCY WORK OF THE AIR CONDENSER WITH TESTING THE DEVICE USEFUL USE WIND ENERGY AT HIGH WIND LOADS

УДК 621.9

С.С. Базюк[1], *И.А. Дерябин*[1], *Д.В. Ивонин*[2], *В.В. Лиханский*[2], *В.Н. Нужин*[1], *Д.М. Солдаткин*[1], *С.А. Токарев*[2], *Ю.В. Шевелева*[1]

[1]ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»,
142100, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24
[2]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
142190, Москва, г. Троицк, ул. Пушковых, 12

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДООХЛАЖДАЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА ДЛЯ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Введение. Проблема замены отработавшего высокообогащенного ядерного топлива (содержание изотопа U-235 — более 20 %) в исследовательских реакторах, эксплуатирующихся в течение тридцати и более лет, с каждым годом приобретает все большую значимость. ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» ведет разработку и поставку для реактора ИВГ.1М (Национальный ядерный центр Республики Казахстан) тридцати штатных водоохлаждаемых технологических каналов (ВОТК-НОУ) с топливом, содержащим 19,75 % изотопа U-235. Целью настоящей работы является определение гидравлического сопротивления (ГС) тепловыделяющей сборки (ТВС) и локальных сопротивлений ВОТК-НОУ для обоснования теплогидравлических характеристик ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М.

Описание ВОТК-НОУ и результатов гидравлических испытаний. ВОТК-НОУ — канал длиной 4990 мм с диаметром корпуса в активной части 76 мм, основными узлами которого являются капсула и тепловыделяющая сборка. ТВС содержит 468 витых твэлов и 36 заполнителей, имеющих длину L_1 = 800 и L_2 = 600 мм и зафиксированных по торцам опорными решетками. Спиральный двухлопастной твэл с диаметром описанной окружности 2,8 мм и толщиной лопасти 1,5 мм при закрутке лопасти вокруг оси с шагом 30 мм состоит из металлургически связанных оболочки и топливного сердечника из сплава Э110 с распределенными нитями урана, обогащенными до 19,75 % по изотопу U-235. Гидравлическое сопротивление ТВС и капсулы определялось прокачкой дистиллята через ВОТК-НОУ на стенде «Контур». Замкнутый контур циркуляции дистиллята объемом 0,5 м^3 обеспечивал расход воды в диапазоне от 1,5 до 15 кг/с. Испытания проводились при температуре жидкости $T_в$ = 292÷295 К и окружающем давлении 0,1 МПа. Всего испытано тридцать ТВС в составе единой капсулы (рис. 1).

Гидравлическое сопротивление пучка твэлов ВОТК-НОУ. Средний гидравлический диаметр ТВС ВОТК-НОУ для прохода воды составляет 1,57 мм. В пучке твэлов реализуется турбулентный режим течения, охватывающий диапазон чисел Рейнольдса Re = (1,98—11,9)·10^3 в зависимости от расхода и температуры воды. Модифицированное число Фруда потока со-

ставляло диапазон $Fr_м$ = 208÷226. КГС пучка твэлов ВОТК-НОУ определялся на основе обработки опытных данных по зависимости перепада давления по длине канала от расхода воды. Исходя из разности перепадов давлений по пучкам твэлов различной длины $\Delta(\Delta p)$, получена зависимость КГС $\xi(\mathrm{Re})$:

$$\xi = \left[2\rho {d_г}^3 \cdot \Delta\left(\Delta p\right)\right] \Big/ \left[\mu^2 \left(L_1 - L_2\right) \mathrm{Re}^2\right], \qquad (1)$$

где ρ, μ — плотность и динамическая вязкость воды; $d_г$ — гидравлический диаметр пучка.

В предположении, что $\Delta(\Delta p) = A \cdot \mathrm{Re}^n$, установлена зависимость КГС пучка витых твэлов ВОТК-НОУ от режима течения:

$$\xi = 0{,}716 \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}326}. \qquad (2)$$

Зависимость сопоставлена с известными соотношениями, описывающими КГС пучка витых труб [1].

Локальные сопротивления в ВОТК-НОУ. Потери давления на трение $\Delta p_{лок}$ и локальные сопротивления ς получены двумя способами. Согласно первому, из опытных данных, местные потери давления найдены экспериментально вычитанием из общего перепада Δp потерь на трение в месте установки ТВС и нивелирного напора. По второму способу $\Delta p_{лок}$ вычислены суммированием вкладов по участкам канала с применением соотношений из [2]. Полученные эффективные локальные коэффициенты сопротивления потока $\varsigma_{эфф}$, отнесенные к площади проходного сечения обоймы ТВС, лежат в диапазоне 30÷60.

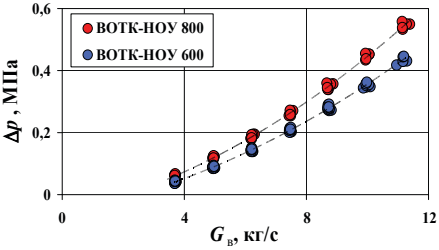


Рис. 1. Зависимости перепада давления от расхода воды для ВОТК-НОУ с длиной твэлов 600 и 800 мм

Применение результатов к условиям работы реактора ИВГ.1М. Как показали испытания, отклонение индивидуального гидравлического сопротивления ВОТК-НОУ относительно среднего значения составляет от 0,75 до 1,31. В предположении постоянства энерговыделения твэлов безразмерный подогрев теплоносителя индивидуального ВОТК-НОУ

$$\delta T_i = \frac{\sqrt{a_i + b_i}}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\sqrt{a_i + b_i}}, \qquad (3)$$

где a, b — поправочные коэффициенты на трение жидкости в пучке и местные сопротивления относительно средних значений соответственно. Подогрев воды

в ВОТК-НОУ с наибольшим гидравлическим сопротивлением δT_{max} увеличится на 14,6 %, а с наименьшим δT_{min} снизится на 13,3 %.

Литература

1. **Данилов Ю.И., Дзюбенко В.Б., Дрейцер Г.А., Ашмантас Л.А.** Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы / под ред. В.М. Иевлева. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
2. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. — Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

S.S. Bazyuk[1], *I.A. Deryabin*[1], *S.V. Ivonin*[2], *V.V. Likhanskii*[2], *V.N. Nuzhin*[1], *D.M. Soldatkin*[1], *S.A. Tokarev*[2], *Yu.V. Sheveleva*[1]

[1]FSUE «SRI SIA «LUCH»,
Russia, 142100, Podolsk, Zheleznodorozhnaya str., 24
[2]AE «SSC RF TRINITI»,
Russia, 142190, Troitsk, Pushkovih str., 12

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF WATER-COOLED TECHNOLOGICAL CHANNEL FOR NUCLEAR REACTOR IVG.1M

УДК 621.9

С.С. Базюк, И.А. Дерябин, С.Д. Киселев, Ю.А. Кузма-Кичта, А.А. Мокрушин, Н.Я. Паршин, Е.Б. Попов, Д.М. Солдаткин

НИИ НПО «ЛУЧ»,
142100, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24

КОРРОЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУГОПЛАВКОЙ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА ЛЕГКОВОДНОГО РЕАКТОРА В УСЛОВИЯХ LOCA

Введение. Перспективными материалами для создания оболочек твэлов реакторных установок является молибден (Mo) и ниобий (Nb) [1]. Кроме того, толерантные твэлы должны обеспечивать повышенную безопасность в условиях аварии LOCA. Проблемы коррозионной стойкости тугоплавких оболочек в водяном паре при $T > 1200$ °С и расхолаживания ТВС ВВЭР и PWR при повторном заливе актуальны для прогнозирования развития аварий с потерей теплоносителя и разработки мер по обеспечению безопасности. Цель работы — экспериментальное исследование коррозии оболочек твэлов из сплава Э110 и молибдена в водяном паре при температурах до 1400 °С и давлении 0,1 МПа, а также оценка длительности расхолаживания модельной ТВС ВВЭР и PWR, собранной из твэлов с Mo оболочками, при повторном заливе в условиях максимальной проектной аварии.

Экспериментальная установка и методика испытаний. Коррозионные испытания образцов оболочек твэлов из сплава Э110Г и молибдена выполнялись на образцах длиной 10—12 мм с диаметральными размерами 9,50×8,33 мм и 13,5×12,9 мм соответственно на стенде ГАЗПАР. До эксперимента образцы оболочек взвешивались и изучалось их состояние, далее окислялись в водяном паре в стационарных условиях при $T = 800$—1400 °С и длительности $(3{,}6—0{,}15)\cdot 10^3$ с. По окончании эксперимента образцы повторно взвешивались и исследовалось состояние их поверхности.

Результаты коррозионных испытаний. Температура образцов из сплава Э110Г превышала температуру печи на 25—30 °С, что обусловлено выделением тепла пароциркониевой реакции (ПЦР). Для образцов Mo оболочек такой эффект не наблюдался. Обобщением опытных данных, представленных в [1], установлены зависимости констант скорости реакций пара с молибденом (ПМР) и ниобием (ПНР) от температуры:

$$K_{p\mathrm{Mo}} = 1{,}498\cdot 10^4 \exp\left[-2{,}329\cdot 10^5 \Big/ (RT)\right], \qquad (1)$$

$$K_{p\mathrm{Nb}} = 12{,}33 \exp\left[-1{,}221\cdot 10^5 \Big/ (RT)\right], \qquad (2)$$

где $R = 8{,}31$ Дж/(моль·К); T — температура, К. Согласно зависимостям (1), (2) тепловые эффекты ПМР и ПНР составляют $Q_{\mathrm{ПМР}} = 2{,}43\cdot 10^6$ Дж/кг и $Q_{\mathrm{ПНР}} = 1{,}32\cdot 10^6$ Дж/кг. Предложенные зависимости удовлетворительно опи-

сывают полученные в настоящей работе опытные данные. С целью подтверждения практического применения корреляций (1) и (2) результаты расчета потери массы металла при окислении в паре сопоставлены с измеренными в диапазоне температур $T = 900 \div 1400$ ºС (рис. 1). Зависимости (1), (2) представляют практическую значимость при определении времени деградации твэла, определяемой в первом приближении полным односторонним окислением оболочки. При $T = 1000$ ºС стойкость Mo в условиях LOCA на порядок выше, чем штатной оболочки из сплава Э110, и составляет 13,5 суток. С повышением температуры до $T = 1200$ ºС, соответствующей граничной температуре самоподдерживающейся ПЦР, деградация Mo оболочки прогнозируется в более чем 3 раза дольше, чем из сплава Э110. Наконец, при $T = 1650$ ºС полная потеря прочностных свойств Mo и Nb оболочек наступит примерно одинаково (через 12,5 мин), что при этой температуре превышает на 60 % длительность деградации Zr оболочки.

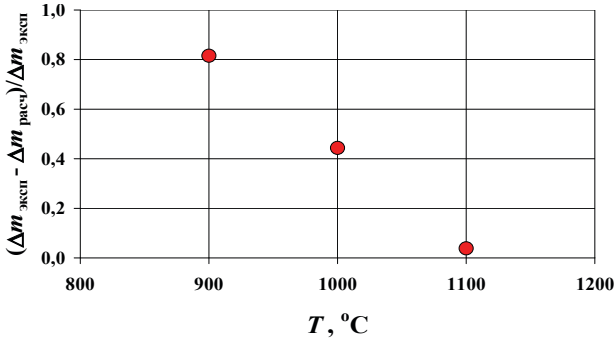


Рис. 1. Отклонение расчетных и опытных данных (стенд ГАЗПАР) по потере массы Mo в водяном паре при $T = 900 \div 1100$ ºС

Высокотемпературное окисление и повторный залив перспективных модельных ТВС. Рассматривался повторный залив в условиях имитации МПА и ЗПА на гипотетических модельных ТВС ВВЭР с твэлами Mo оболочками (ТВС-Mo). Полученный результат сопоставлялся с полученными опытными и расчетными данными по длительности расхолаживания модельной ТВС стенда ПАРАМЕТР с оболочками имитаторов твэлов из сплава Э110 (ТВС-Zr). Результаты расчетов по методике [2] показали, что время расхолаживания ТВС-Mo, разогретой до $T_{обол} = 970$ ºС, больше на 8 % по сравнению с ТВС-Zr. В условиях разогрева модельных тепловыделяющих сборок по достижению $T_{обол} = 1600$ ºС, определяемой по ТВС-Zr (базовый случай), оболочки имитаторов твэлов ТВС-Mo и ТВС-Nb холоднее на 70—80 ºС. При этом циркониевые оболочки потеряют ~ 65 % толщины чистого металла, молибденовые — 46 %, а ниобиевые прореагируют полностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 16-08-01283-а.

Литература

1. **Kilpatrick M., Lott S.** Reaction of flowing steam with refractory metals. I. Molybdenum (1100—1700°) // Journal Of Physical Chemistry. 1965. Vol. 69. No 5. P. 1638—1640.
2. **Исследование** характеристик повторного залива модельных ТВС легководных реакторов с учетом масштабного фактора и теплофизических свойств имитатора твэла / С.С. Базюк, Н.Я. Паршин, Ю.А. Кузма-Кичта и др. // Материалы 9-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск: АО «ОКБ Гидропресс», 2015.

S.S. Bazyuk, I.A. Deryabin, S.D. Kiselev, Yu.A. Kuzma-Kichta, A.A. Mokrushin, N.Ya. Parshin, E.B. Popov, D.M. Soldatkin

FSUE «Scientific-Research Institute Scientific-Industrial Association «LUCH», Russia, 142100, Podolsk, Zheleznodorozhnaya str., 24

OXIDATION CHARACTERISTICS OF LWR FUEL ROD REFRACTORY CLADDING UNDER LOCA CONDITIONS

УДК 532.5; 621.039.58

А.Ш. Байрамуков, О.В. Митрофанова*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское шоссе, 31

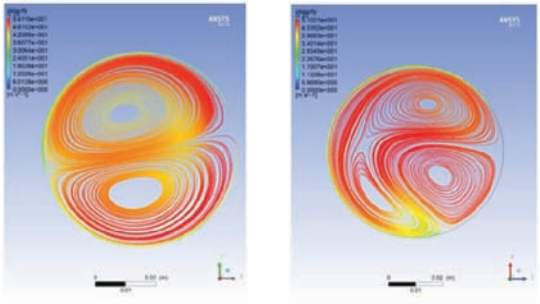
*e-mail: bayramuks@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СУДОВЫХ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (ЯЭУ)

Целью проводимых исследований является разработка принципов физико-математического моделирования для научного обоснования проектных решений, обеспечивающих повышенный ресурс эксплуатации ледокольных ЯЭУ нового поколения с реакторными установками интегрального типа. Программа развития атомного ледокольного флота России предусматривает создание судовой ЯЭУ четвертого поколения, конструкция и компоновка которой претерпели существенную модернизацию. Вместе с тем сохранились и общие черты с ЯЭУ предыдущих поколений, в частности вынесенная за пределы корпуса ядерного реактора система компенсации давления. Она выполнена в виде отдельно стоящих сосудов большого объема, соединенных с корпусом ядерного реактора посредством тонких гнутых трубопроводов.

Для обеспечения надлежащего ресурса работы трубопроводов, соединяющих компенсатор давления с ядерным реактором, требуются особые меры, ввиду знакопеременных нагрузок, возникающих при движении теплоносителя, имеющего разные температуры внутри реактора и в газовых баллонах системы компенсации давления. Возникающие при этом процессы термоциклирования и газовыделения могут приводить к образованию трещин в стенках трубопроводов, что, в конечном итоге, ведет к аварии с разгерметизацией первого контура ядерного реактора[1].

Проведенные в настоящей работе вычислительные эксперименты показали, что довольно серьезной проблемой является расчет процессов перемешивания струй жидкости с различными температурами. Полученные расчетные результаты наглядно подтверждаются опытными фактами, накопленными в процессе эксплуатации транспортных ЯЭУ. В частности, в работах [1, 2] приводятся сведения о разрушении конструкций корпусных ЯЭУ в результате появления трещин после нескольких тысяч часов работы реакторных установок, так как сосуды и трубопроводы давления подвергаются циклам термосилового воздействия (100—1000 и более циклов), что приводит к процессам усталости металла, коррозионной усталости или развитию уже имеющихся в металле несплошностей по механизмам усталости [2].



а) *б*)

Рис. 1. Трансформация вихревой структуры потока после горизонтального (*а*) и следующего за ним вертикального (*б*) гибов

На рис. 1 приведены изменения вихревой структуры потока в трубопроводной системе компенсатора давления судовой ЯЭУ. Полученные результаты иллюстрируют эффект влияния кривизны канала на генерацию систем крупных локальных вихрей [3], генерирующих акустические колебания в звуковом частотном диапазоне.

Следует отметить, что при численных расчетах закрученных течений проблема моделирования турбулентности по-прежнему является актуальной. Исследования авторов работы [4] показывает, что наиболее адекватной моделью турбулентности при внутреннем течении в криволинейных каналах является модель DES (Detached Eddy Simulation).

Полученные результаты предполагается использовать для решения оптимизационных задач в целях обеспечения безопасности работы системы компенсации давления судовых ЯЭУ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00687-а.

Литература

1. **Хлопкин Н.С.** Морская атомная энергетика. М.: МИФИ, 2007. 244 с.
2. **Гетман А.Ф., Козин Ю.Н.** Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления. М.: Энергоатомиздат, 1997. 288 с.
3. **Митрофанова О.В.**. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: Физматлит, 2010. 288 с.
4. **Сентябов А.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А.** Исследование моделей турбулентности для расчета закрученных течений // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 1. С. 81—93.

A.S. Bayramukov, O.V. Mitrofanova

National Nuclear Research University «MEPHI»,
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31

HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER SIMULATIONS OF MARINE NUCLEAR POWER INSTALLATIONS IN TRANSIENT MODES

УДК 621.45.032

Р.Д. Бердов, Н.Н. Волков, Л.И. Волкова, И.Н. Гурина, В.В. Миронов

Государственный научный центр Российской Федерации —
Исследовательский центр имени М.В. Келдыша,
125438, Москва, ул. Онежская, 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ДВУХФАЗНЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ИЗ СОПЕЛ БОЛЬШИХ СТЕПЕНЕЙ РАСШИРЕНИЯ

Наиболее распространенной системой создания высотных условий для испытания РД или агрегатов РД, как известно, является газодинамическая труба (ГДТ). Газодинамические вопросы являются основными для данного типа устройств, но в обеспечение длительной работоспособности устройства необходимо решать и задачи тепломассообмена. За время испытаний конструкция ГДТ подвергается высоким тепловым и эрозионным нагрузкам. Тепловые нагрузки порядка 1 МВт/м^2, эрозионные нагрузки связаны с осаждением к-фазы на стенки, что происходит при испытаниях РДТТ. Для защиты конструкции ГДТ используют системы тепловой и эрозионной защиты. Для проектирования таких систем и выбора режимов их работы, необходимо иметь методы расчетов тепловых нагрузок на стенки.

Основной целью работы является изучение и анализ распределения тепловых потоков по длине экспериментальной ГДТ для дальнейшего использования полученных результатов при построении методики расчета.

Эксперименты проводились на твердотопливном газогенераторе. В ходе работы проведены серии экспериментов, в которых использовали металлизированное и неметаллизированное твердое топливо, кроме этого, производили имитацию работы узла впрыска с варьированием расхода впрыскиваемой воды. В каждом эксперименте получены распределения тепловых потоков по длине ГДТ.

В результате анализа полученных данных выделены основные процессы, определяющие тепловые нагрузки в стенки ГДТ. Проведено сравнение результатов экспериментов на металлизированном и неметализированном топливе. Получены значения коэффициентов критериальной зависимости для определения чисел Нуссельта. Для экспериментов с впрыском воды выявлены особенности зоны смешения и испарения.

Литература

1. **Шишков А.А., Силин Б.М.** Высотные испытания реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1985. 208 с.

2. **Газодинамические** и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А.М. Губертов, В.В. Миронов, Д.М. Борисов и др.; под ред. А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2004.
3. **Экспериментальное** исследование процессов в газодинимической трубе при истечении двухфазных продуктов сгорания / В.В. Миронов, Н.Н. Волков, Л.И. Волкова, Р.Д. Бердов и др. // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 4. С. 147—155.

R.D. Berdov, N.N. Volkov, L.I. Volkova, I.N. Gurina, V.V. Mironov

The State scientific centre of Russian Federation – federal state unitary enterprise
«Research centre named after M.V. Keldysh»,
Russia, 125438, Moscow, Onezhskaya str., 8

THE RESEARCH OF HEAT-MASS EXCHAGE PROCESSES IN GASDYNAMIC TUBE WHEN TWO-PHASE COMBUSTION PRODUCTS FLOW THROUGH

УДК 533.6.011.6

М.С. Бояркин, В.Н. Ковальногов

Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ НИЗКОСОРТНЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ РЕЦИРКУЛИРУЕМЫМИ УХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ ДЛЯ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В докладе рассмотрен комплекс вопросов, связанных с моделированием, исследованием и разработкой энергоэффективных технологий сжигания низкосортных твердых топлив для котельных установок малой распределенной энергетики. Предложена технология обогащения низкосортных твердотопливных пеллет (получаемых путем прессования из отходов лесозаготовительных, деревоперерабатывающих, сельскохозяйственных производств) рециркулируемыми уходящими газами котельной установки. Технология предусматривает досушку и прогрев пеллет с одновременным насыщением их капиллярно-пористого пространства синтез-газом и горючими компонентами рециркулируемого газа, что в комплексе способствует наиболее полному сгоранию пеллеты и повышению показателей топливной эффективности и экологической чистоты котельной установки.

Разработаны математическая модель, разностная аппроксимация дифференциальных уравнений, определяющих кинетику тепловлажностного состояния и насыщения пеллеты, а также алгоритм расчета. Математическое моделирование и численное исследование проводили в целях получения априорной информации для разработки технологии обогащения пеллет рециркулируемыми уходящими газами в части назначения ее режимов. В соответствии с подходом, изложенным в работе [1], моделирование проводили на основе сопряженного решения задач нестационарной теплопроводности и влагопереноса. Коэффициенты диффузии влаги в капиллярно-пористом пространстве пеллеты определяли экспериментально по методике [2].

Анализ полученных результатов показывает, что поля температуры и влагосодержания в пеллете являются существенно трехмерными, при этом на стадии прогрева пеллеты характер распределения температуры по толщине в центральной ее части качественно отличается от распределения на периферии. В центральной части профили температуры и влагосодержания являются выпуклыми, а на периферии – профиль температуры становится вогнутым. Профиль влагосодержания при этом по-прежнему остается выпуклым. Выпуклый профиль температуры, на первый взгляд (с позиций одно- и даже двумерной модели тепломассопереноса), кажется парадоксальным, поскольку отвод теплоты с поверхности сопровождается одновременным увеличением температуры пеллеты. Однако анализ данных, соответствующих периферийным участкам пеллеты, показывает, что подвод теплоты

в пеллету на этой стадии происходит по периферийным участкам, которые осушаются в первую очередь, а далее посредством теплопроводности в теле пеллеты теплота отводится в центральную область.

В течение достаточно длительного промежутка времени (в рассматриваемых условиях около 3 ч) температурное поле в центральной части пеллеты остается однородным и практически не изменяется с течением времени (температура поддерживается близкой к температуре «мокрого» термометра). И только после начала осушения периферийной части поверхности пеллеты температура в центре начинает повышаться. Наибольшая скорость осушения имеет место в окрестности угловых точек пеллеты. Изменение температуры вне зависимости от относительной координаты происходит по схожей траектории в отличие от изменения влагосодержания пеллеты. Осушение в середине пеллеты происходит медленнее по сравнению с периферией. Вычислительный эксперимент при варьировании параметрами рециркулируемого газа показал, что существенное влияние на длительность процесса сушки пеллеты оказывают температура и влажность газа.

Результаты исследований будут использованы при разработке новых и совершенствовании действующих технологических процессов подготовки низкосортного твердого топлива для котельных установок.

Исследования выполнены при поддержке грантом РФФИ № 15-48-02275-р_а.

Литература

1. **Kovalnogov V.N., Karpukhina T.V., Korotkov E.A.** Mathematic modeling of the kinetics of heat-and-humidity state of capillary-porous bodies under convection drying // AIP Conference Proceedings, 1738, 480005 (2016); doi: 10.1063/1.4952241.
2. **Патент РФ № 2469292.** Способ определения коэффициента диффузии жидкости в капиллярно-пористом теле / В.Н. Ковальногов, Н.Н. Ковальногов, Т.В. Павловичева. № 2011114023/28. Заявл.08.04.2011. Опубл. 10.12.2012. Бюл. № 34.

M.S. Boyarkin, V.N. Kovalnogov

Ulyanovsk State Technical University,
Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz str., 32

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF TECHNOLOGY OF ENRICHMENT OF LOW-GRADE SOLID FUELS BY RECIRCULATED EXHAUST GASES FOR BOILER PLANTS

УДК 621.365

В.С. Волгин, А.Ф. Гиневский*

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная, 14

*e-mail: volginvs@list.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО МОДУЛЯ

В последние годы в связи с созданием новых термоэлектрических материалов, обладающих улучшенными характеристиками, и с разработкой новых возобновляемых источников энергии, возрос интерес к применению термоэлектрических охлаждающих и генераторных модулей в различных областях.

Существующие теоретические методики расчета параметров и интегральных характеристик термоэлектрических модулей (ТЭМ), применяемых для охлаждения [1], имеют большое число упрощений и недостатков. Из-за этого расчетные интегральные характеристики ТЭМ могут существенно отличаться от реальных.

Чтобы реализовать корректный расчет параметров ТЭМ, необходимо учесть факторы, которые влияют на распределения температуры в модуле. Это можно сделать, только применяя строгое математическое моделирование, которое учитывает все особенности теплообмена в конструкции с применением ТЭМ.

В области термоэлектрических устройств численное моделирование успешно применяется для решения различных задач. Его активно применяют для изучения и оценки перспективных конструкций термоэлектрических генераторов электроэнергии [2]. Ряд исследователей изучают численные модели микротермоэлектрических кулеров, которые впоследствии планируется применять для решения проблемы так называемых «горячих точек» [3].

В работе представлена математическая модель ТЭМ, который находится в составе системы охлаждения объекта. Помимо ТЭМ в нее входит радиатор, охлаждающий горячий спай. В основе модели лежит численное решение трехмерных уравнений системы сопряженного теплообмена с поверхностями элементов модуля с окружающим их воздухом. В модели были учтены объекты, которые вносят дополнительное термическое сопротивление в конструкцию (интерфейсы, термопаста).

Движение воздушных потоков и теплообмен в нем описываются стационарным уравнением Навье—Стокса для несжимаемой жидкости, уравнением неразрывности и уравнением энергии соответственно.

Из рис. 1 видно, что отдельные термоэлектрические элементы находятся при различных температурах горячего и холодного спая. Поэтому оценивать их работу по одномерным моделям нецелесообразно. А численное моделирование позволяет рассчитать любые зависимости, например, зависимость средней температуры процессора от скорости обдува, мощности, выделяемой на процессоре, и т.д.

В заключение следует отметить, что в настоящей работе показано, что только последовательное применение численного моделирования позволяет правильно рассчитать интегральные характеристики ТЭМ в условиях их реального функционирования.

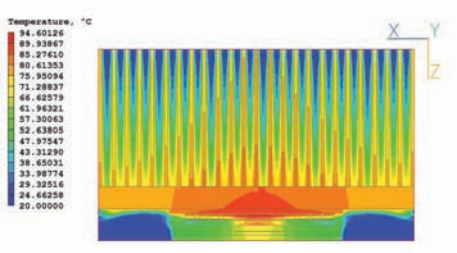


Рис. 1. Распределение температурного поля в системе

Литература

1. **Булат Л.П., Бузин Е.В.** Термоэлектрические охлаждающие устройства: метод. указания. СПб.: СПбГУНиПТ, 2001. 41 с.
2. **Анатычук Л.И., Кобылянский Р.Р.** О некоторых особенностях динамических режимов работы термогенератора, использующего тепло человека // Термоэлектричество. 2014. № 3.
3. **Wang P., Bar-Cohen A., Yang B.** Analytical modeling of silicon thermoelectric microcooler. 2006. 13 p.

V.S. Volgin, A.F. Ginevskii

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14

THERMOELECTRIC COOLING MODULE INTEGRAL CHARACTERISTICS RESEARCH

УДК 536.24

А.С. Гавриш, А.Н. Шевченко, Т.А. Мисюра

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,
Украина, 03056, г. Киев, просп. Победы, 37, КПИ-1510

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРГИДРОФОБНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Введение. Интерес к процессу капельной конденсации претерпел за последние годы несколько периодов активизации исследований. Развитие технологий изготовления и эксплуатации поверхностей позволяет более детально изучить этот сложный процесс и выработать рекомендации по его оптимальному применению. Последующее накопление новых знаний требует постоянного обращения к уже существующей исследовательской базе. По-прежнему остается актуальным подбор стойкого активатора с малым термическим сопротивлением на теплопередающих поверхностях с характерно высокой поверхностной энергией.

Механизм образования и развития конденсата. Понимание механизмов процесса конденсации пара на поверхностях теплообмена является важным не только с технической точки зрения, но и исходя из вопросов экологии и социального развития. Среди подобных задач можно выделить рациональное использование водных запасов, аккумуляцию воды для бытовых нужд, опреснение воды, уменьшение размеров и массы теплообменных аппаратов, а также повышение коррозионной стойкости материалов. Реализации этих целей и должны служить супергидрофобные поверхности, получение которых невозможно без понимания механизма процесса конденсации.

В общем случае конденсация является нестационарным процессом. Однако если осредненные во времени характеристики процесса будут оставаться практически неизменными, то такой процесс можно рассматривать как «квазистационарный», а при определенных условиях — и как стационарный. Одновременное существование тонких и толстых пленок, а также видимых капель следует представлять только в динамике. Эффекты действия капиллярных сил, поверхностного натяжения и расклинивающего давления также сосуществуют в динамике.

Необходимое переохлаждение насыщенного пара над тонкими и толстыми пленками, а также над сферическими поверхностями капель могут существенно отличаться между собой. Чем больший температурный напор пар-стенка, тем больше микронеровностей способны быть центрами конденсации. На интенсивность теплообмена будут влиять также физические свойства сред, которые участвуют в данном процессе. При конденсации паров органических и неорганических веществ, воды и др. необходимая величина переохлаждения может существенно разниться.

Супергидрофобные поверхности. В процессе развития технологий производства супергидрофобных поверхностей использовали так называемые «восходящие» (химическое окисление, прямой рост) и «нисходящие» (литография с влажным и сухим травлением) методы. Супергидрофобные поверхности дают возможность детально изучить сложный межфазный феномен капельной конденсации. А это, в свою очередь, позволяет исследовать пути оптимизации капельной конденсации на микро- и наноуровнях. Примером «идеального» покрытия служит природный «эффект листков лотоса». На такой поверхности капля принимает форму, которая будет близкой к сферической. Этот «эффект» успешно применяется для создания супергидрофобных поверхностей. Такие поверхности дают возможность регулировать режим конденсации за счет изменения ее свойств и геометрии покрытия. Это позволяет определить морфологию конденсатных образований от капель Вензеля до капель Кейси. Ключевым феноменом капельной конденсации на супергидрофобных поверхностях является способность капель размерами до 10 мкм отскакивать при их слиянии. Самопроизвольные отскоки капель дают возможность осуществления альтернативного метода транспортирования конденсата.

Заключение. При капельной конденсации на супергидрофобных поверхностях наблюдаются высокие значения коэффициентов теплоотдачи, которые значительно превышают соответствующие значения для пленочной, псевдокапельной и капельной конденсации на слабогидрофобных поверхностях. Супергидрофобные поверхности требуют дальнейшего своего развития и исследований. Важными остаются поиски альтернативных методов организации капельной конденсации, изучение самого процесса и характерных для него механизмов. Эффект Марангони бинарных смесей может служить условным началом отсчета для решения подобных проблем. Конденсация водяного пара с использованием стимуляторов линейки Гидроэффект-Нанопротек соответствует промежуточному положению между слабо- и супергидрофобными конденсационными поверхностями. При выполнении ряда дополнительных условий процесс будет приближаться к супергидрофобным поверхностям.

A.S. Gavrish, A.N. Shevchenko, T.A. Misyura

National Technical University of Ukraine
«Kyiv Politechnical Institute named Igor Sikorskiy»,
Ukraine, 03056, Kyiv, Peremoga ave., 37, KPI-1510

ABOUT SUPERHYDROPHOBIC SURFACES PERSPECTIVE APPLICATION

УДК 621.039.746

Ю.А. Горский, А.А. Плетнев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ КОНТЕЙНЕРА ТУК-109 ПРИ ХРАНЕНИИ И ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ОЯТ РЕАКТОРОВ РБМК-1000

Технические требования к отработавшему ядерному топливу РБМК-1000, поступающему на сухое хранение после предварительной выдержки в водных хранилищах, установлены ОСТ 95 10585—2003. Минимальное время хранения ОТВС в воде, предшествующее постановке на сухое хранение, должно составлять 10 лет.

Соблюдение требований стандарта провоцирует вероятность остановки производственного и технологического цикла по причине исчерпания подлежащего переводу на «сухое» контейнерное хранение кондиционного топлива. При этом в бассейнах ХОЯТ ЛАЭС останется еще значительное число кондиционных ОТВС со сроком выдержки от 9 до 3 лет.

Решению данной проблемы может способствовать обоснованное снижение требований к максимальной мощности остаточного тепловыделения ОЯТ, допускаемого к контейнерному хранению. В связи с чем актуальным является исследование теплового состояния металлобетонного контейнера ТУК-109, загруженного ОЯТ с суммарным остаточным тепловыделением более 7,7 кВт на контейнер.

МБК представляет собой толстостенный герметично закрытый цилиндрический корпус. Внутри расположен чехол для ампул и сами ампулы с пучками твэлов.

После загрузки ампулы с твэлами в ТУК-109 и проведения операций по осушке внутренней полости контейнера эксплуатация ампул происходит при следующих параметрах:

- среда во внутренней полости контейнера – аргон;
- давление во внутренней полости контейнера, МПа – 0,08;
- максимальная температура оболочки ампулы при хранении и транспортировании — не более 300 °С.

Для расчетов используется модель контейнера, находящегося в транспортном положении, в двумерной постановке. Рассматривались несколько вариантов загрузки топлива с различным временем предварительной выдержки.

Расчеты показали, что тепловое состояние контейнера, загруженного ОЯТ 10-летней выдержки, полностью удовлетворяет условиям стандартов.

В случае загрузки ОЯТ 7,5-летней выдержки температура оболочки ампул превышает максимальное проектное значение. Комбинирование в кон-

тейнере топлива разной выдержки позволяет снизить максимальную температуру и добиться удовлетворения технический требований.

Согласно результатам расчетов существует возможность безопасного хранения и транспортировки в контейнерах ТУК-109 частично загруженных ОЯТ со сроком предварительной выдержки менее 10 лет.

Литература

1. **Технологический** процесс перевода ОЯТ РБМК-1000 с «мокрого» на «сухое» хранение / В.И. Калинкин, В.Г. Крицкий, Н.В. Размашкин и др. СПб.: Изд-во ООО «Типография «Береста», 2010. 108 с.
2. **ОСТ 95 10585—2003.** Отработавшие тепловыделяющие сборки энергетических реакторов. Сухое хранение ОТВС РБМК-1000 и ВВЭР-1000. Технические требования.

Y.A. Gorskiy, A.A. Pletnev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL REGIMES OF TUK-109 CASK FOR INTERIM STORAGE AND TRANSPORTATION OF RBMK-1000 SPENT NUCLEAR FUEL

УДК 621.43

Ю.А. Гришин, В.С. Семенчукова

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В СИСТЕМЕ «ТРУБОПРОВОД—КЛАПАН—ОБЪЕМ»

При решении широкого круга газодинамических задач с нестационарным течением, в частности в системах пневмоавтоматики, в системах газообмена и пневмопуска поршневых двигателей и т.п., весьма актуальным является численное моделирование процессов в комплексе «трубопровод—клапан—объем» (в общем случае с переменным давлением).

В данной работе представлено математическое описание нестационарных процессов в такой системе и результаты соответствующих численных расчетов. Для моделирования в трубопроводе используется численный метод распада разрыва [1] с граничным условием на входе типа «втекание при постоянном давлении». Наибольшую сложность представляют собой граничные условия для расчета течения через клапан, где имеются переменное проходное сечение и переменный перепад давлений, который обусловливает существование докритического и критического режимов истечения с соответствующим «запиранием» в наиболее узком проходном сечении клапанной щели.

Численные исследования проводились для системы пневмопуска двигателя, и здесь необходимой частью работы являлось определение зависимости коэффициента расхода μ клапана от хода его открытия с помощью ПК *Fluent* (рис. 1).

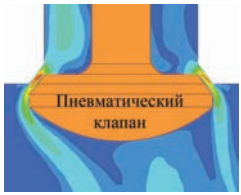


Рис. 1. Течение в проточной части клапана (м/с)

В результате были получены значения μ как отношения интегрального действительного расхода к расходу идеального течения.

Система соотношений, выражающих граничные условия у клапана, была разработана на базе представления о распаде произвольного разрыва с использованием нестационариных [2] и стационарных [3] газодинамических функций, выражающих перепады давлений в клапанной щели и на фронте отраженной от клапана простой волны:

$$\left(\frac{p_c}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{\left(1+\frac{k-1}{2}M_{1/2}^2\right)\left(1-\frac{k-1}{2}M_1\right)^2}{\left(1+\frac{k-1}{2}\left(\frac{M_k}{\mu}\right)^2\right)\left(1-\frac{k-1}{2}M_{1/2}\right)^2}, \qquad (1)$$

а также расход через клапанную щель:

$$q(M_{1/2}) = \overline{f}\, q\left(\frac{M_k}{\mu}\right). \qquad (2)$$

Здесь p_c, p_1 — давления в цилиндре и в первой ячейке численного расчета в трубе; k — показатель адиабаты; $M_{1/2}$, M_k, M_1 — соответственно числа Маха для границы 1/2 у клапана, в клапанной щели и в первой ячейке; q — расходная газодинамическая функция; $\overline{f} = \mu F_k / F_t$ — отношение площадей эффективного проходного сечения клапана к проходному сечению трубы. Система уравнений (1), (2) решается методом итераций, что позволяет определить неизвестные значения $M_{1/2}$, M_k за фронтом отраженной от клапана волны и в клапанной щели.

Последовательность алгоритма вначале предполагает оценку режима течения через клапан. Для этого принимается $M_k = 1$, с помощью (2) находится соответствующее $M_{1/2}$. Эти значения с помощью (1) позволяют определить перепад давлений между цилиндром и первой ячейкой численного расчета, при котором наступает критический режим. При меньшем перепаде выполняется «докритический» расчет с помощью (1), (2), при большем — с условием запирания, когда фиксируется $M_k = 1$ и соответствующее $M_{1/2}$.

Найденное значение $M_{1/2}$ с помощью нестационарных газодинамических функций позволит определить потоки массы, импульса и энтальпии через границу 1/2, необходимые для продолжения сквозного счета процесса в трубе.

Созданный алгоритм и реализованная на его основе программа позволяют моделировать волновые процессы в системах типа «трубопровод-клапан—объем» с целью последующей их конструкторской и параметрической оптимизации.

Литература

1. **Численное** решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. М.: Наука, 1976. 350 с.
2. **Гришин Ю.А., Круглов М.Г., Рудой Б.П.** Газодинамические функции для расчета нестационарных течений газа // Изв. вузов. Машиностроение. 1977. № 3. С. 52—58.
3. **Абрамович Г.Н.** Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1. — 5-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 600 с.

Y.A. Grishin, V.S. Semenchukova

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

MODELING OF A TRANSIENT GAS FLOW IN A 'TUBE-VALVE-VOLUME' SYSTEM

УДК 536.2+532.517.6

И.А. Давлетшин[1]*, *А.А. Паерелий*[1], *И.М. Газизов*[2]

[1] Казанский научный центр РАН,
420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31

[2] Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева — КАИ,
420111,. г. Казань, К. Маркса, 10

*e-mail: davlet60@mail.ru

ТЕПЛООТДАЧА ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА В ДИФФУЗОРЕ

Введение. Основной массив имеющейся информации по тепловым и гидродинамическим процессам в потоках с наложенными пульсациями скорости относятся к каналам постоянного сечения [1]. Исследования же процессов в каналах переменного сечения (градиентных потоках) в подавляющем большинстве случаев ограничено стационарными режимами [2]. Между тем в отрывных потоках наложенные пульсации способны приводить к дополнительной интенсификации теплоотдачи по сравнению со стационарными режимами [3].

Постановка эксперимента. В работе проведено экспериментальное исследование теплоотдачи на стенке диффузора на пульсирующих режимах течения рабочей среды (воздуха). Пульсации потока создавались периодическим перекрыванием проходного сечения канала вращающейся заслонкой. Диффузор имел прямоугольное сечение 150х40 мм^2 на входе и 150х100 мм^2 на выходе и располагался в средней части плоского канала длиной 1,2 м. Диффузорный участок создавался соответствующим наклоном одной стенки канала, напротив которой была установлена теплообменная стенка длиной 450 мм.

Теплообменная стенка представляла собой пластину (печатную плату) из стеклотекстолита. Медное покрытие платы функционально было оформлено в виде 33 термометров сопротивления, которые измеряли локальные значения температуры стенки во время проведения опытов с шагом 13,6 мм по длине канала. Далее по динамике этих температур в процессе охлаждения (на регулярном режиме) определялось распределение коэффициента теплоотдачи на стенке.

Результаты исследования. На рис. 1 приведены распределения коэффициента теплоотдачи в диффузоре с углом раскрытия 8º при среднерасходной скорости потока во входном сечении U = 5,6 м/с и числе Re = 2,3·10^4 (по эквивалентному диаметру), при разных частотах f и относительных амплитудах β пульсаций. В целом наблюдается снижение коэффициента теплоотдачи по длине канала, связанное, очевидно, со снижением средне-

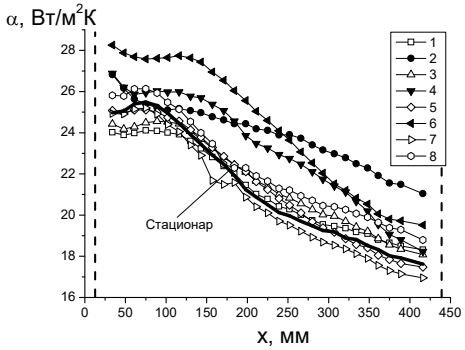


Рис. 1. Коэффициент теплоотдачи: *1,2* — f = 6 Гц; *3,4* — f = 9 Гц; *5,6* — f = 12 Гц; *7* — f = 70 Гц; *8* — f = 140 Гц; светлые значки — β~0,3; темные — β~0,8

расходной скорости потока. При малых амплитудах пульсаций потока распределения α оказались близкими к распределению стационарного режима.

На начальном участке диффузора распределения коэффициента теплоотдачи имеют локальные максимумы. Ниже по потоку все распределения монотонно убывают. В целом пульсации потока приводят к интенсификации теплоотдачи до 20 % при высоких амплитудах (диффузорная часть канала выделена штриховыми линиями).

Такие распределения коэффициента теплоотдачи в диффузоре, по-видимому, могут быть связаны с характером течения в канале: безотрывным или отрывным. На безотрывных режимах распределения коэффициента теплоотдачи будут монотонными. С появлением отрыва потока на стенке взаимодействие отрывной области с наложенными пульсациями потока может приводить к формированию крупномасштабных вихрей, сопровождающихся интенсификаций тепло- и массообменных процессов в канале.

Литература

1. **Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В.** Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. М.: Машиностроение, 1977. 256 с.
2. **Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Решмин А.И.** Теплообмен в конических расширяющихся каналах // ТВТ. 2016. Т. 54. № 2. С. 287—293.
3. **Давлетшин И.А., Михеев Н.И.** Структура течения и теплообмен при отрыве пульсирующего потока // ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 442—449.

I.A. Davletshin[1], *A.A. Paereliy* [1], *I.M. Gazizov*[2]

[1] Kazan Scientific Center of RAS ,
Russia, 420111, Kazan, Lobachevskiy str., 2/31
[2] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI,
Russia, 420111, Kazan, K. Marks str., 10

HEAT TRANSFER OF THE PULSATING FLOW IN DIFFUSER

УДК 621.039

М.Ю. Жарков[2], *Д.О. Соколов*[1]*, *Б.Л.Х. Чан*[1], *А.Н. Варава*[1], *И.Е. Люблинский*[2]

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14
[2]АО «Красная звезда»,
115230, Москва, Электролитный проезд, 1А
*e-mail: den19941970@gmail.com

ИННОВАЦИОННЫЙ СПОСОБ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКОВ С КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫМИ СТРУКТУРАМИ

При создании экспериментальных термоядерных энергетических систем и термоядерных систем ближайшего будущего, таких как, например, термоядерный источник нейтронов (ТИН) и демонстрационный термоядерный реактор ДЕМО (ДЕМО-С), кроме проблем, связанных непосредственно со стационарным длительным удержанием плазмы, возникает ряд технологических трудностей, которые в настоящее время еще не решены или требуют дополнительных исследований и обоснования возможности их использования.

Одной из таких проблем является обеспечение надежной тепловой защиты элементов конструкции термоядерного реактора, таких как дивертор, лимитер, бланкет, системы инжекционного дополнительного нагрева, контактирующих с плазмой и потоками высокоэнергетических частиц, и их охлаждение на различных температурных уровнях.

Подход к использованию жидких металлов, в первую очередь лития в совокупности с капиллярно-пористыми структурами (КПС) разрабатывается уже длительное время, и эта идея показала свой высокий потенциал, а также широкие перспективы развития этого направления. Но реализация данной идеи требует решения своих определенных научно-технических задач. Наиболее актуальной из них является разработка и обоснование новых высокоэффективных методов охлаждения жидкометаллических внутрикамерных элементов термоядерных реакторов (лимитеры, дивертор, первая стенка).

Одним из наиболее перспективных способов охлаждения высокотемпературной поверхности является использование диспергированной жидкости.

Авторами представлен обзор отечественных и зарубежных трудов по тематике: современные термоядерные энергетические системы, способы охлаждения высокотемпературных поверхностей, диспергирование жидкостей.

Рассмотрен метод охлаждения, применительный к элементам термоядерных установок-токамаков с внутрикамерным покрытием из капиллярно-пористых систем, пропитанных жидким металлом, основанный на использовании газодисперсной смеси.

Разработана конструкция экспериментальной модели стационарно работающего лимитера токамака, включающая внешнюю систему температурной стабилизации.

Представлены чертежи рабочих участков экспериментальной установки по исследованию эффективности струйного охлаждения энергонагруженных элементов.

Литература

1. **Исаченко В.П., Кушнырев В.И.** Струйное охлаждение. М: Энергоатомиздат, 1984. 216 с.
2. **Люблинский И.Е.** Литий в энергетическом термоядерном реакторе // ВАНТ, серия «Термоядерный синтез». 2006. Вып. 3. С. 3—26.

M.Y. Zharkov[2], *D.O. Sokolov*[1], *B.L.H. Tran*[1], *A.N.Varava*[1], *I.E. Lyublinskiy*[2]

[1]National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14
[2]AO «Red star»,
Russia, 115230, Moscow, Electrolitnyy proyezd, 1A

AN INNOVATIVE WAY TO SOLVE THE PROBLEM OF COOLING AND TEMPERATURE STABILIZATION ELEMENTS TOKAMAKS WITH CAPILLARY-POROUS STRUCTURES

УДК 532.1

В.А. Жигарев[1]*, *А.В. Минаков*[1,2], *А.Л. Неверов*[1]

[1]Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
*e-mail: zhigarev.vladimir@yandex.ru

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ТЕЧЕНИЙ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ В СКВАЖИНАХ

Приоритетным направлением в вопросах бурения нефтяных и газовых скважин является разработка методов и программ по снижению перепада давления в стволе скважины при прокачивании по ней бурового раствора. Для эффективного и надежного управления процессом бурения критически важно иметь информацию о гидравлическом сопротивлении и структуре течения в скважине непосредственно в процессе бурения. Несмотря на огромное количество теоретических, расчетных и экспериментальных исследований по течениям бурового раствора в скважинах, имеющихся на сегодняшний день, в полной мере невозможно дать необходимую информацию о всех параметрах течения в скважине в требуемом широком диапазоне параметров буровой колонны и реологических свойств бурового раствора.

В данной работе для решения этой задачи использовались методы вычислительной гидродинамики (CFD), основанные на численном решении пространственных и нестационарных уравнений Навье—Стокса применительно к сложной реологии реальных буровых растворов [1]. В качестве реологических законов течения в скважине рассмотрены все основные модели (степенная модель, бингамовская модель, модель Herschel-Bulkley), описывающие в широком диапазоне параметров поведение большинства буровых растворов.

Для тестирования расчетного алгоритма создан экспериментальный стенд. Стенд представлял собой замкнутый контур. В рабочий участок подавалась жидкость из бака при помощи центробежного насоса. Расход жидкости регулировался вентилями и контролировался при помощи расходомера. Далее жидкость попадала в рабочий участок – кольцевой канал, длина которой составляла 1 м. Измерения перепада давления на участке трубы проводились при помощи дифференциального манометра. Проведен ряд экспериментов, в котором варьировался расход и измерялась зависимость перепада давления от расхода в широком диапазоне от 0,01 до 10 л/мин. Для верификации экспериментального стенда в начале были проведены опыты на чистой воде. Полученные экспериментальные результаты по перепаду

давления с высокой точностью совпали с известными аналитическими решениями. Проведена серия экспериментов на модельных и реальных буровых растворах с известными реологическими показателями. Получены зависимости перепада давления от реологических свойств и расхода модельного раствора. Эти данные использовались для тестирования численной методики моделирования течения неньютоновской жидкости в кольцевых каналах. Получено хорошее согласие расчета и эксперимента.

Была проведена адаптация численной методики на расчете потерь давления в реальной скважине [2]. Для проведения расчетных исследований создана полная гидравлическая модель скважины, учитывающая реальную компоновку бурильной и колонковых труб комплекса ССК-NQ, расход жидкости варьировали в диапазоне от 40 до 70 л/мин, частота вращения бурильной колоны 300—600 об/мин. Выполнен анализ течения в отдельных элементах скважины. Установлено, что основные потери давления возникают при движении бурового раствора именно в кольцевом пространстве. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными замерами, полученными на скважине в процессе бурения. Показано, что расчетные данные потерь давления хорошо согласуются с зафиксированными потерями давления при бурении скважины во всем диапазоне изменения параметров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 16-41-243034.

Литература

1. **Гаврилов А.А., Минаков А.В., Дектерев А.А., Рудяк В.Я.** Численный алгоритм для моделирования установившихся ламинарных течений неньютоновских жидкостей в кольцевом зазоре с эксцентриситетом // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17. № 1. С. 44—56.
2 **Неверов А.Л., Минаков А.В., Жигарев В.А., Каратаев Д.Д.** Повышение эффективности сооружения глубоких скважин комплексами со съемными керноприемниками // ФТПРПИ. 2016. № 6. С. 75—85

V.A. Zhigarev[1], *A.V. Minakov*[1,2] *A.L. Neverov*[1]

[1] Siberian Federal University,
Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny ave., 79
[2] Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF NON-NEWTONIAN FLOWS DRILLING MUD WELLS

УДК 536.2; 539.3

В.С. Зарубин, Е.С. Сергеева

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ НАНОКОМПОЗИТА НА ЕГО ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕРМОУПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В различных областях техники широкое распространение получили композиционные материалы. Композиты — это многокомпонентные материалы, состоящие, как правило, из основного материала (матрицы), армированного наполнителями, являющимися носителями таких свойств, как высокая прочность, теплопроводность, вязкость и т.д. Использование в технике таких материалов позволяет уменьшать массу создаваемой конструкции при сохранении или даже улучшении ее теплофизических и термомеханических характеристик. Одним из наиболее широко применяемых типов матрицы композитов является полимерная [1] (смолы, каучуки, фторопласты и т.д.) Это обусловлено предъявляемыми требованиями к технологическим свойствам матрицы [2]: высокой прочности сцепления матрицы с включениями, невысокой вязкости для хорошего смачивания включений в процессе пропитки, возможности изготовления препрегов и т.д. Однако в процессе изготовления композита редко удается достичь отсутствия такого дефекта материала, как пористость.

Большой интерес представляют нанокомпозиты — материалы, армированные наноразмерными элементами. В таких композитах характерный размер включений не превышает нескольких сотен нанометров. В последнее время в качестве армирующих элементов рассматривают включения в виде частиц графена, однослойных и многослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ и МУНТ), фуллеренов и углеродных нанокластеров [3, 4]. Даже при малых концентрациях армирующих элементов значительно улучшаются теплофизические и термоупругие характеристики материала [5].

В данной работе построена математическая модель, позволяющая установить количественную связь эффективных теплофизических и термоупругих характеристик композита с пористостью, свойствами матрицы и объемной концентрацией армирующих включений в виде хаотически ориентированных анизотропных ОУНТ. Основными инструментами при построении этой модели и ее анализе являются метод самосогласования [6, 7], заключающийся в осреднении возмущений напряженно-деформированного состояния в среде с искомыми характеристиками, вызванных включениями, и подход, основанный на двойственной вариационной формулировке задач теплопроводности и термоупругости в неоднородном твердом теле [8]. Для получения итоговых расчетных зависимостей ОУНТ представлена вытянутым эллипсоидом вращения, теплопроводность и термоупругие свойства

которого связаны с характеристиками графена в плоскости его изотропии [9].

Установлено, что теплопроводность и упругие характеристики композита сильнее зависят от пористости материала, чем его температурный коэффициент линейного расширения. Приведенные в работе расчетные зависимости дают возможность прогнозировать теплопроводность и термоупругие свойства пористого композита по заданным характеристикам и объемной концентрации армирующих элементов и свойствам матрицы.

Литература

1. **Справочник** по композиционным материалам. В 2 кн. Кн. 1. / пер. с англ. А.Б. Геллера и др.; под ред. Дж. Любина, Б.Э. Геллера. М.: Машиностроение, 1988. 448 с.
2. **Васильев В.В.** Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
3. **Casati R., Vedani M.** Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles: A Review // Metals. 2014. Vol. 4. P. 65—83.
4. **Степанищев Н.В.** Нанокомпозиты: проблемы наполнения // Пластикс: Индустрия переработки пластмасс. 2010. № 4. С. 23—27.
5. **Сергеева Е.С.** Исследование упругих характеристик композитов с эллипсоидальными включениями // Молодежный науч.-техн. вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. №. 5.
6. **Континуальная** теория дислокаций: пер. с англ. / Дж. Эшелби. М.: ИЛ, 1963. 248 с.
7. **Шермергор Т.Д.** Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 400 с.
8. **Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н.** Математические модели механики и электродинамики сплошной среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 512 с.
9. **Зарубин В.С., Сергеева Е.С.** Исследование связи упругих характеристик однослойной углеродной нанотрубки и графена // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 1. С. 100 – 110. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-1-100-110.

V.S. Zarubin, E.S. Sergeeva

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

POROSITY INFLUENCE IN NANOCOMPOSITES ON ITS THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMOELASTIC CHARACTERISTICS

УДК 536.27

А.В. Золотухин[1,2]*

[1] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
[2] Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
*e-mail: zoloav@mail.ru

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА ПРИ ОБТЕКАНИИ СОТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Проведены экспериментальные исследования турбулентной структуры течения при продольном обтекании сотовой поверхности с шестиугольными ячейками. Рассматриваемые в настоящей работе сотовые поверхности имеют ряд сходных черт с вихрегенераторами. Об этом свидетельствуют результаты первых экспериментальных исследований продольного обтекания поверхностей с сотовыми покрытиями [1, 2].

Главной особенностью аэродинамической картины взаимодействия течения над сотами является скольжение потока по поверхности, величина которого может достигать до 30 % скорости в ядре потока. Это обстоятельство дает основание для использования подобных систем вихрей в качестве эффективных методов управления процессами турбулентного переноса. Отсутствие детальной опытной информации о структуре поля течения не позволяет создать целостную картину данного сложного явления и требует более глубокого его изучения.

Данная работа посвящена опытному исследованию развития поля течения и турбулентных характеристик вдоль поверхности (из текстолита) с гексагональными сотами с поперечными размерами ячеек 5 мм, глубиной 21 мм и толщиной стенок 0,2 мм, а также двух участков сот (из пластика) с размерами ячеек 12 мм, толщиной стенок 0,5 мм и глубиной 2,4 и 6 мм. Рабочий канал экспериментального стенда имел прямоугольное сечение 21×150 мм, длину 1 м и был выполнен из прозрачного органического стекла толщиной 8 мм. Поперечные размеры входного канала подбирались из условий обеспечения двумерного течения в центральном продольном сечении канала. На расстоянии 580 мм от входа в канал заподлицо монтировались сотовые пластины размерами 40×200 мм и 58×182 мм. Измерения выполнены с помощью PIV системы, состоящей из твердотельного импульсного Nd:YAG лазера с длительностью вспышки 5 нс и цифровой камеры с матрицей 1 Мпикс. Измерительная область составляла 17×20 мм. Для расчета векторов использовался кросс-корреляционный Фурье-метод. В опытах изучалось развитие течения по всей длине сотовых пластин в нескольких

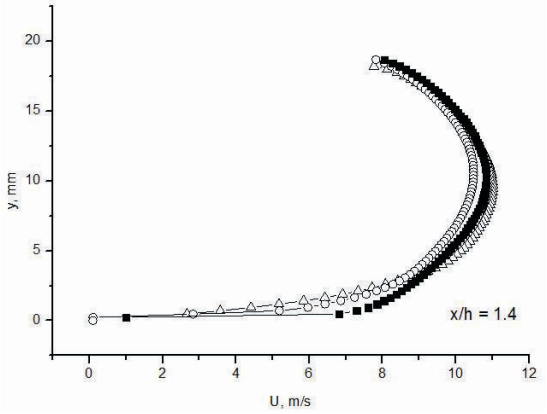


Рис. 1. Распределение скорости на гладкой стенке (-■-) и сотовых поверхностях с глубиной ячеек 21 мм (-○-) и 2,4 мм (-Δ-)

сечениях при постоянных числах Рейнольдса: Re = Uh/ν = (7—28)·10^3, где h — высота канала.

Развитие профилей продольной скорости в пограничном слое на сотовых поверхностях демонстрируется на рис. 1; данные здесь получены для сечения, отстоящего на x/h = 1,4 от начала сотовой секции.

На ячеистой поверхности пограничный слой оттесняется от стенки и затем по мере его дальнейшего продвижения деформированная область распространяется на все большую часть пограничного слоя. В итоге профиль становится менее заполненным и приближается к ламинарной зависимости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации НШ-8780.2016.8 и при частичной поддержке РНФ (грант ОНГ № 14-19-00402п).

Литература

1. **Климов А.А., Трдтьян С.А**. Использование сотовой поверхности для управления пограничным слоем // ТВТ. 2003. Т. 41. № 6. С. 901—906.
2. **Trdatyan S.A., Klimov A.A.** Friction and heat transfer on a honeycomb surface in laminar and turbulent flows // Proc. 12-th Int. Heat Transfer Conf. Grenoble, 2002. P. 221.

A.V. Zolotukhin [1,2]

[1] Institute of Thermophysics SS Kutateladze SB RAS,
630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1
[2] Novosibirsk State Technical University,
630073, Novosibirsk, K. Marks ave., 20

CHARACTERISTICS OF FLOW STREAM FLOWING OVER CELL SURFACES

УДК 621.9

В.А. Иванова, А.А. Шайкина*

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

*e-mail: valerya.ivi@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ НА РЕЖИМЕ РЕВЕРСА

Представлены результаты численного моделирования гидродинамических процессов, протекающих в модельных каналах вихревых энергоразделителей.

В работах [1, 2] показано, что при определенном сочетании режимных и геометрических параметров наблюдается реверс вихревой трубы. Он заключается в том, что из отверстия диафрагмы истекают подогретые массы газа, а не охлажденные. При этом полная температура периферийного потока, покидающего камеру энергоразделения через дроссель, ниже исходной. А.П. Меркуловым введено понятие вторичного вихревого эффекта [2] и предпринята попытка его объяснения, основанная на теоретических положениях гипотезы взаимодействия вихрей. При работе вихревой трубы на высоких степенях закрутки в приосевой зоне отверстия диафрагмы вследствие существенного снижения уровня давления в области, где статическое давление меньше давления среды, в которую происходит истечение, возникает зона обратных в осевом направлении течений, т.е. в отверстии диафрагмы образуется рециркуляционная зона. При некотором сочетании геометрических и режимных параметров взаимодействие зоны рециркуляции и вытекающих элементов в виде кольцевого закрученного потока из периферийной области диафрагмы приводит к образованию вихревой трубы, наружный контур которой ограничен неподвижной окружающей средой.

Сетка расчетной области (рис. 1) структурированная, имеется сгущение в области пограничного слоя. Общее число узлов в сетке порядка 820 тыс. Численное моделирование и расчет характеристик течения, а также полей термогазодинамических параметров в объеме камеры энергоразделения вихревой трубы выполнен в коммерческом пакете. Математическая модель предполагала, что течение описывается системой трехмерных уравнений Навье—Стокса, уравнениями энергии и состояния. Турбулентная вязкость определялась SST-моделью.

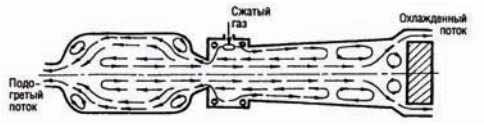


Рис. 1. Схема образования вторичных течений, объясняющих реализацию вторичного вихревого эффекта на режиме реверса

Для верификации результатов расчета использовались экспериментальные данные А.П. Меркулова на вихревой трубе с замкнутым цилиндрическим объемом, установленным за отверстием диафрагмы [2].

В результате визуализации картины течения в камере энергоразделения вихревой трубы построены графики основных характеристик эффекта энергоразделения. Показано, что при определенных условиях в камере энергоразделения происходит перестройка профилей тангенциальной, аксиальной и радиальной скоростей с образованием слоистых течений, в которых периферийный поток частично за счет радиальной составляющей начинает истекать в виде кольцевого потока из отверстия диафрагмы в окружающую среду в виде интенсивно закрученного потока, обмениваясь импульсом, массой и энергией с рециркулирующим потоком из окружающей среды. В периферийный поток при этом будет перекачиваться энергия из возвратного приосевого.

Режим реверса наблюдается при малых значениях μ. На режиме μ = 0,18 эффект реверсивности максимален, после чего при дальнейшем уменьшении μ он снижается.

Литература

1. **Пиралишвили Ш.А. Поляев В.М., Сергеев М.Н.** Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / под ред. А.И. Леонтьева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.
2. **Меркулов А.П.** Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. 185 с.

V.A. Ivanova, A.A. Shaykina

Rybinsk State Aviation Technical University,
Russia, 152934, Rybinsk, Pushkin str., 53

MODELING OF THE VORTEX TUBE ON REVERSE MODE

УДК 536.24

А.В. Ильинков, А.В. Щукин, И.И. Хабибуллин,*
В.В. Такмовцев, Р.И. Ахметшин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева — КАИ,
420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

*e-mail: rim3li490@mail.ru

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХПОЛОСТНОЙ ДИФФУЗОРНОЙ ВЫЕМКИ

В докладе приведены результаты опытного исследования значений коэффициентов давления C_p в области эпицентров крупномасштабных вихревых структур двухполостной диффузорной выемки (ДДВ), полученных при варьировании высоты ребра-разделителя полостей. Установлены целесообразные значения высоты этого ребра, обеспечивающие высокую интенсивность самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур. Показано, что увеличение относительной высоты этого ребра приводит к снижению интенсивности самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур. В то же время без этого ребра самоорганизующиеся крупномасштабные вихревые структуры неустойчивы.

Выполнен сравнительный анализ тепловизионных изображений охлаждаемых поверхностей одиночной полусферической и двухполостной диффузорной выемок. Выявлены области ДДВ, в которых интенсивность охлаждения наиболее высока.

Сравнительный анализ тепловизионных картин на поверхностях охлаждаемых внешним потоком выемок, полученных с помощью тепловизора NEC 7700 TH, показал, что в ДДВ интенсивное охлаждение обтекаемой воздухом поверхности происходит в областях выходной кромки, возвратного течения и в области эпицентров самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур. В то же время сферические выемки отрывного типа характеризуются интенсивным охлаждением только месяцеобразного участка поверхности в области выходной кромки. Установлено, что в двухполостной диффузорной выемке область интенсивного теплосъема занимает в 2—2,5 раза больше площади поверхности по сравнению с площадью теплосъема в полусферической выемке.

Работа выполнена в рамках базовой части госзадания Министерства образования и науки РФ в сфере научной деятельности по проектам № 777 и № 3475.

A.V. Ilinkov, A.V. Shchukin, I.I. Habibullin,
V.V. Takmovtsev, R.I. Akhmetshin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI,
Russia, 420111, Kazan, K. Marks str., 10

HEAT AND HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF DIFFUSER-TYPE TWO-HOLLOW CAVITY

УДК 536.24

С.П. Карлов, Н.С. Захаров, Д.А. Некрасов, В.В. Резник*

Московский политехнический университет,
105066, Москва, ул. Старая Басманная, 21/4

*e-mail: NicolaZaharov@yandex.ru

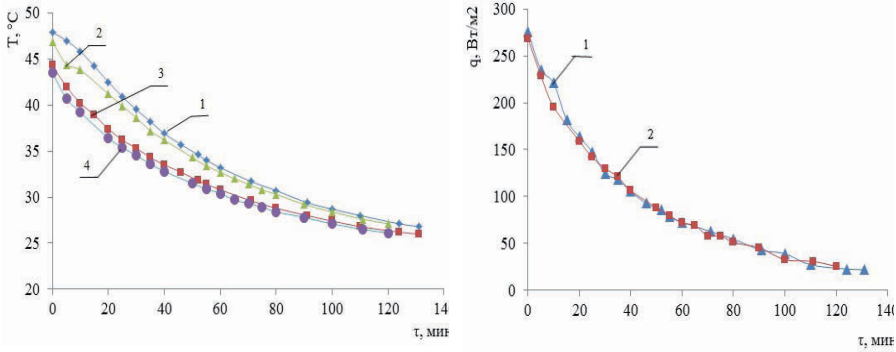
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СРЕДАХ И ГЕЛЯХ

Применение упорядоченных микроструктурированных дисперсных сред, а также гелей различной природы является одним из перспективных направлений развития промышленных технологий нефтедобычи, экологической защиты хранилищ отходов, а также медицинских технологий по созданию биореакторов для выращивания биологических объектов, основанных на технологии 3D печати. Такие микроструктурированные системы, наравне со свойствами восстановления формы при механическом разрушении, обладают нестационарностью и анизотропией, обусловленные структурой и поведением среды переноса [1]. Для управления свойствами таких дисперсных систем внешними воздействиями требуются постановка и решение новых задач изучения закономерностей тепло- и массопереноса.

В предлагаемой работе исследована кинетика формирования и некоторые свойства гелей различной плотности. Исследования проводились в диапазоне температур от 20 до 50 °С. Для решения поставленной задачи был создан экспериментальный участок, основанный на спектрографическом методе исследования [2, 3], позволяющий проводить измерения и регистрацию динамики формирования гелей в зависимости от температуры в режиме реального времени. Исследования проводились в диапазоне длин волн от 300 до 1100 нм. Для регистрации температуры в процессе формирования исследуемых объектов выполнена модернизация реализованных методик дополнительным тепловизионным комплексом.

На основе использования оптических методик в сочетании с тепловизионным комплексом получены данные нестационарного распределения поля температур с учетом анизотропных свойств формирующегося геля. Определены тепловые потоки в процессе формирования гелей различных плотностей. В результате анализа экспериментальных данных получены расчетные зависимости температуропроводных свойств используемых гелей. Для гелей различной плотности методом движущейся границы измерены коэффициенты диффузии.

На рис. 1 представлены некоторые результаты исследований — динамика охлаждения агарозного геля различной плотности, помещенного в цилиндрическую емкость, и соответствующие этому процессу значения тепловых потоков.



а) *б*)

Рис. 1. Экспериментальные результаты: *а* – измерения температур ($T_{центр}$: *1* – 0,6 %; *2* — 1,0 %; $T_{пов}$: *3* — 0,6 %; *4* – 1,0 %) и *б* — тепловых потоков в процессе формирования агарозных гелей различной плотности (*1* — 0,6 % , *2* — 1,0 %)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 15_19_00177).

Литература

1. **Amsden B.** Solute diffusion within hydrogels. Mechanisms and Models // Macromolecules. 1998. № 31. P. 8382—8395.
2. **Pokusaev B.G., Karlov S.P., Vyazmin A.V., Nekrasov D.A.** Peculiarities of diffusion in gels // Thermophysics and Aeromechanics. 2013. Vol. 20. No 6. P. 749.
3. **Rees D.A., Scott W.E. and Williamson F.B.** Correlation of optical activity with polysaccharide conformation // Nature. 1970. No 227. P. 390—392.

S. P. Karlov, N. S. Zakharov, D. A. Nekrasov, V.V. Reznik

Moscow Polytechnic University,
Russia, 105066, Moscow, Staraia Basmannaia str., 38

STUDY OF HEAT AND MASS TRANSFER IN MICROSTRUCTURED MEDIA AND GELS

УДК 621.039.58

П.В. Колобаева

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
115191, Москва, ул. Большая Тульская, 52

ВЕРИФИКАЦИЯ КОДА HYDRA-IBRAE/LM/V2 ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МОДЕЛЯМ ПЕРЕНОСА И ОСАЖДЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ РУ БН

В настоящее время перспективным направлением в развитии атомной энергетики является разработка проектов и строительство АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН). Обоснование новых проектов проводится на базе исследований на экспериментальных установках с характерными для РУ БН режимными параметрами, а также на основе моделирования характерных явлений с помощью расчетных кодов. Одним из таких кодов является разрабатываемый в ИБРАЭ РАН канальный теплогидравлический код HYDRA-IBRAE/LM/V2 [1, 2].

Для решения задачи моделирования переноса и поведения радионуклидов в натриевом теплоносителе в код HYDRA-IBRAE/LM/V2 был внедрен программный модуль AEROSOL-LM/Na. Доклад посвящен верификации кода HYDRA-IBRAE/LM/V2 применительно к моделям переноса и осаждения продуктов деления в контурах РУ с натриевым теплоносителем. Цель работы – обоснование применимости кода для моделирования поведения ПД в натриевом теплоносителе на основе эксперимента по исследованию переноса и осаждения цезия в замкнутом контуре, проведенного на установке FPBL (США) [3, 4].

В докладе представлена матрица верификации модуля AEROSOL-LM/Na, которая включает основные явления, связанные с поведением продуктов деления, активации и коррозии в натриевом теплоносителе и газовом объеме. Разработанная к настоящему времени матрица верификации содержит два интегральных эксперимента и три аналитических теста.

Для обоснования применимости кода HYDRA-IBRAE/LM/V2 к расчету процессов переноса и осаждения продуктов деления проведено моделирование эксперимента по исследованию поведения цезия в замкнутом контуре с холодными ловушками при заданной начальной массовой концентрации цезия в натрии (0,73 млн$^{-1}$) и изменении температуры натрия в контуре от 394 до 866 К. В расчете моделируется изменение массовой концентрации цезия в натриевом теплоносителе. Представлены результаты анализа сходимости по расчетной сетке и шагу по времени, а также чувствительности и неопределенностей к исходным данным эксперимента. Определены параметры, к которым результаты расчета наиболее чувствительны (массовый расход натрия, температура натрия, высота контура) и получен диапазон

изменения расчетных значений концентрации цезия в натрии. Средняя относительная погрешность моделирования составила не более ±6 %.

Также представлен пример расчета аналитического теста переноса примеси цезия в аргоне при стационарном течении в канале из четырех последовательно соединенных ячеек одинакового размера, выполненного с целью проверки правильности программной реализации соответствующих моделей в модуле AEROSOL/LM-Na. В результате моделирования получены зависимости изменения массы цезия от времени, которые сравнивались с аналитическим решением. Относительная погрешность расчета не превысила 0,07 %.

На основе полученных результатов сделан вывод о применимости кода HYDRA-IBRAE/LM/V2 с модулем AEROSOL/LM-Na для моделирования поведения продуктов деления в замкнутом контуре РУ с натриевым теплоносителем.

Литература

1. **Modeling** of liquid metal flow using system thermohydraulic code HYDRA-IBRAE/LM and CFD code CONV-3D / V.M. Alipchenkov, V.V. Belikov, S.I. Vasilev et al. // Proceedings of the THINS 2014 International Workshop Modena, Italy, January 20-22, 2014. Paper 4. 10 p.
2. **Моделирование** процессов тепломассообмена тяжелых жидкометаллических теплоносителей для анализа нестационарных процессов в контурах АЭС / В.М. Алипченков, В.В. Беликов, В.А. Веретенцев и др. // Тезисы Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. В 3 томах (27–31 октября 2014 г., Москва). Т.1. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. С. 91—92.
3. **J. Guon.** Deposition of Cesium and Barium in a Sodium-stainless steel system. 1970.
4. **Корсун А.С., Семенов В.Н., Цаун С.В.** Численное моделирование осаждения цезия в натриевых контурах с помощью кода СОКРАТ-БН // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2015. № 4. С. 58—68.

P.V. Kolobaeva

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 115191, Moscow, Bolshaya Tulskaya str., 52

MODEL VERIFICATION FOR TRANSPORT AND DEPOSITION OF FISSION PRODUCTS IN PRIMARY LOOP OF SODIUM FAST REACTOR FOR HYDRA-IBRAE/LM/V2 CODE

УДК 621.039, 628.165

М.В. Конюшин, Е.Д. Федорович, В.В. Сергеев*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: maxkonjushin@gmail.com

ОПРЕСНЕНИЕ МОРСКОЙ ВОДЫ НА АЭС. ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Пресная вода является одним из основных ресурсов в жизнедеятельности человека. Однако в связи с увеличивающимся потреблением пресной воды в мире, во многих районах мира уже наблюдается дефицит пресной воды. Одно из возможных решений данной проблемы – развитие опреснения морской воды. Стоит отметить, что процесс опреснения морской воды требует большого количества энергии [1].

С технико-экономической точки зрения наиболее совершенными в решении проблемы опреснения являются дистилляционные опреснительные установки, отличающиеся высокой производительностью, простотой исполнения, надежностью и хорошим качеством получаемой воды [2].

Однако использование традиционных источников энергии на органическом топливе не является оптимальным решением. Данное обстоятельство вызвано тем, что в случае использования традиционных источников энергии возникнет необходимость дополнительного увеличения потребления органического топлива (нефти и газа) [1]. Из мировой практики известно, что варианты увеличения потребления нефти и газа не могут быть рассмотрены в связи с колоссальным потреблением в настоящее время данных ресурсов и возможностью ускоренного истощения месторождений нефти и газа.

Таким образом, одним из возможных вариантов является использование дистилляционных установок на атомных электрических станциях (АЭС). Использование АЭС в качестве источника энергии для дистилляционных установок обусловлено тем, что АЭС являются сравнительно недорогим источником энергии для опреснения воды в больших количествах [1].

Как показывает мировая практика, вопросы об использовании АЭС в качестве источника энергии для опреснения морской воды актуальны и обсуждаются. Исследователями предлагаются различные варианты возможностей использования энергии АЭС с целью опреснения морской воды [3].

В рамках доклада будет представлен обзор имеющейся в опубликованных источниках информации о возможностях опреснения морской воды с учетом использования энергии АЭС.

Литература

1. **Хрусталев В.А., Писанец В.А.** Оценка технико-экономической эффективности двухцелевого ядерно-опреснительного комплекса // Вестник Саратовского Государственного технического университета. 2011. Т. 1. № 3 (54). С. 59—69.
2. **Слесаренко В.Н.** Дистилляционные опреснительные установки / М.: Энергия, 1980. 248 с.
3. **Status** of design concepts of nuclear desalination plants // IAEA. Vienna. 2002.

M.V. Konyushin, E.D. Fedorovich, V.V. Sergeev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

SEA WATER DESALINATION AT NPP.
PUBLISHED SUBMISSIONS REVIEW

УДК 536.24

И.В. Крайнова, Е.В. Чебаков*

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
125993, Москва, Волоколамское ш., 4

*e-mail: igrid@mail

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНЕШНЕГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АППАРАТ

Одной из важнейших задач при управлении космическим аппаратом (КА) является определение его ориентации в пространстве, что в настоящее время обеспечивается традиционными способами, основанными на использовании оптических приборов. Представляются предложения по новому способу определения ориентации КА, основанному на оценке внешнего теплового воздействия, который в целях увеличения точности ориентации и надежности КА может быть использован в качестве дополнительного или резервного.

Способ базируется на последовательном решении двух обратных задач: сначала определяются тепловые потоки, подводимые к поверхности КА по внутренним температурным измерениям, а затем оценивается угловое положение аппарата по полученным значениям тепловых потоков.

Тепловые потоки, воздействующие на КА в системе Солнце—КА—планета, целесообразно определять с помощью аналитических выражений, представленных в работах [1—3].

Как известно, угловое положение аппарата в орбитальной системе координат задают тремя углами. Составлена система уравнений, для которой выражены три неизвестных, содержащихся в трех компонентах суммарного радиационного излучения. Формулы прямого и отраженного от планеты солнечного излучения и собственного излучения планеты преобразованы так, чтобы они зависели от этих трех неизвестных углов.

Ориентация КА определяется с помощью полученной системы уравнений, решение которой осуществляется практически любым численным методом.

Литература

1. **Механика** космического полета / М.С. Константинов, Е.Ф. Каменков и др.; под ред. В.П. Мишина. М.: Машиностроение, 1989. 408 с.
2. **Моделирование** тепловых режимов космических аппаратов / Л.В. Козлов, М.Д. Нусинов и др.; под ред. Г.И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
3. **Малоземов В.В., Рожнов В.Ф., Праветский В.Н.** Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 584 с.

I.V. Krainova, E.V. Chebakov

Moscow Aviation Institute (National Research University)
Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoye sh., 4

DETERMINATION OF THE SPACECRAFT ANGULAR POSITION BASED ON THE ESTIMATION OF EXTERNAL HEAT FLUXES ON SPACECRAFT

УДК 536.4

Г.В. Кузнецов, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, ул. Ленина, 30

*e-mail: piskunovmv@tpu.ru

ИНТЕНСИВНОЕ ДРОБЛЕНИЕ КАПЛИ ВОДЫ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ ЧАСТИЦЫ ГРАФИТА

Современные системы пожаротушения имеют довольно низкую эффективность. Это является их основной проблемой. В опубликованных результатах научных исследований достаточно обоснованно говорится о том, что менее половины задействованного объема воды эффективно используется в традиционных технологиях пожаротушения. В случае лесных пожаров около 80—90 % сброшенной авиацией воды уходит в грунт, т.е. практически не используется в процессе пожаротушения. На данный момент самый простой способ увеличения полноты испарения воды в зоне горения — это использование мелкодисперсных аэрозолей. Однако такой подход имеет свои ограничения, связанные с уносом капель из зоны горения продуктами сгорания. При использовании крупных капель времена их испарения могут достигать десятков секунд. Это неприемлемо для систем пожаротушения — капли за такое время пролетят область горения. Таким образом, необходимо определять для каждого конкретного очага горения оптимальный размер капель (чтобы последние полностью испарялись в процессе движения через пламя), либо измельчать крупные капли воды в пламени. В ранних исследованиях нашего коллектива в капли воды добавлялись различные твердые непрозрачные включения. Такой подход при высокотемпературном нагреве позволил интенсифицировать прогрев капель воды и в некоторых опытах зарегистрировать признаки их интенсивной деформации и даже фрагментации. Однако в этих опытах эффект дробления неоднородных капель происходил нестабильно. Поэтому установление условий устойчивого инициирования эффекта интенсивного дробления капель при высокотемпературном нагреве остается актуальной задачей, и в первую очередь важно определить материал включений, способствующий стабильной реализации выделенного эффекта.

В настоящем исследовании установлено, что эффект взрывного дробления слоя жидкости неоднородной капли устойчиво (в 10 опытах из 10 проведенных) происходит при использовании в качестве материала включений натурального графита (природного происхождения; фаза графита с чистотой не менее 98 % по данным рентгенофазового анализа, выполненного с применением установки Shimadzu XRD 7000S), обладающего теплофизическими свойствами, приведенными на рис. 1. Интересной особенностью про-

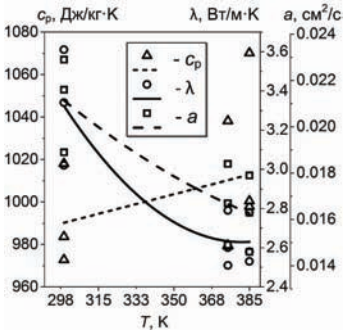


Рис. 1. Теплофизические свойства графита: c_p — удельная теплоемкость; λ — коэффициент теплопроводности; a — коэффициент температуропроводности

цесса, установленной в ходе экспериментов, является значительная роль структуры поверхности твердого графитового включения в достижении условий инициирования эффекта взрывного дробления. Установлено (с применением сканирующего микроскопа Hitachi TM3000), что после процесса интенсивного парообразования жидкости на поверхности графитового включения формируются крупные углубления и шероховатости, которые предположительно влияют на зарегистрированное теневым методом увеличение краевого угла смачивания поверхности материала. Доказано, что при использовании частицы графита повторно (т.е. при наличии на поверхности крупных углублений и шероховатостей) эффект взрывного дробления слоя жидкости не наблюдается. Предполагается также, что испаряющаяся при нагреве собственная влага (от 3 до 4,5 % массы включений) частиц графита выступает в роли одного из инициирующих рассматриваемый эффект условий, как и поверхность графитового ранее неиспользованного включения с микроскопическими однородными по размеру порами, через которые выделяется образующийся в полостях пар, а также содержащийся внутри включений воздух. Обоснована на основе эксперимента по измерению температур элементов неоднородной капли (поверхности пленки воды и включения под пленкой, а также внутренней полости включения) доминирующая роль лучистого переноса тепловой энергии в достижении условий интенсивного парообразования жидкости на внутренней границе раздела сред с ее взрывным дроблением — при высокотемпературном нагреве на гетерогенной границе неоднородной капли зарегистрирована более высокая температура по сравнению с поверхностью пленки воды.

G.V. Kuznetsov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak

National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenina str., 30

INTENSIVE FRAGMENTATION OF WATER DROP WHEN ADDING GRAPHITE PARTICLE

УДК 532.685

И.Н. Лазаренко[1]*, *Д.А. Коновалов*[2]

[1] АО «Гидрогаз»,
394033, г. Воронеж, просп. Ленинский, 160
[2] Воронежский государственный технический университет,
394026, г. Воронеж, просп. Московский, 14
*e-mail: saintigorek@rambler.ru

КОНВЕКТИВНЫЙ СТАЦИОНАРНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛОТЫ В МИКРОКАНАЛЬНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ ИЗ НИТЕВИДНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Появление компактных энергонапряженных элементов систем различного предметного назначения вызвало необходимость их эффективного охлаждения с целью стабилизации температурного режима. Решение этой проблемы основано на использовании различных микропористых сред с регулярной структурой, обладающих высоким значением коэффициента теплоотдачи.

В работах В.М. Поляева, А.И. Леонтьева, Б.В. Дзюбенко, K. Vafai и др. показано, что в случае регулярной структуры матрицы удается достигнуть требуемых характеристик теплообменных элементов для охлаждения поверхностей с интенсивным тепловыделением, а сдерживающим фактором является отсутствие надежной и управляемой технологии их производства.

Для анализа конвективного теплообмена в таких средах феноменологические модели, основанные на уравнениях Дарси—Бриннмана—Форгчхеймера, неприемлемы в силу невыполнения физических предпосылок при их обобщении (иррегулярность скелета, локальная сопряженность матрицы, что позволяет считать ее «псевдонепрерывной» и т.д.).

Принятая модель исследуемой кремниевой подложки с матрицей нитевидных монокристаллов кремния и ее расчетная схема показаны на рис. 1, 2. Матрица нитевидных монокристаллов кремния была представлена как пористая среда, состоящая из пучка «квазицилиндров» с отсутствием локального сопряжения и регулярной структурой.

Для подтверждения количественной адекватности предложенной математической модели были проведены экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена в микроканальном теплообменном элементе с регулярной матрицей из нитевидных монокристаллов кремния на специально сконструированной пилотной установке.

Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных показал количественное согласование результатов (рис. 3, 4).

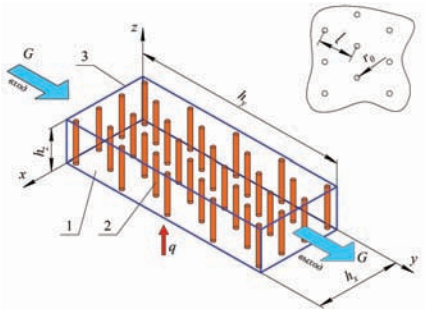


Рис. 1. Расчетная схема пористого теплообменника: *1* — охлаждаемая поверхность; *2* — кремниевый кристалл цилиндрической геометрии; *3* — теплоизолированный корпус теплообменника

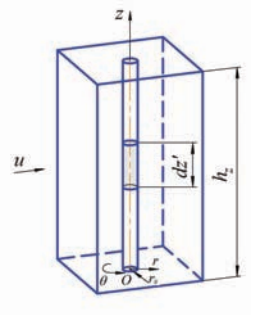


Рис. 2. Элементарный объем с локальной системой координат

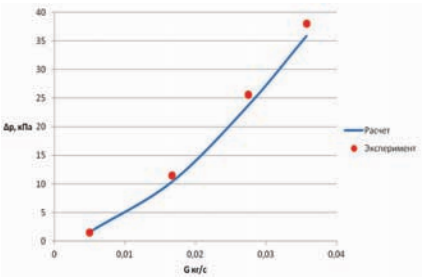


Рис. 3. Расходная характеристика потерь давления теплоносителя

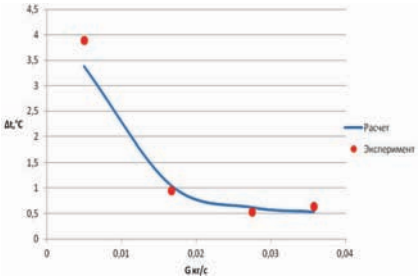


Рис. 4. Расходная характеристика перепада температур теплоносителя

По результатам экспериментальных исследований предложена критериальная зависимость для определения локального числа Нуссельта и эмпирическая формула для расчета потерь давления

$$\mathrm{Nu} = 2{,}5713\ \mathrm{Re}^{0{,}4976}\ ;\ \Delta p = 9128{,}362\ G^{1{,}6381}\ .$$

I.N. Lazarenko[1], *D.A. Konovalov*[2]

[1]Joint-stock company «Hydrogas»,
Russia, 394033, Voronezh, Leninsky ave., 160
[2]Voronezh State Technical University,
Russia, 394026, Voronezh, Moskovsky ave., 14

STATIONARY CONVECTION HEAT TRANSFER IN THE MICROCHANNEL HEAT TRANSFER ELEMENTS BASED ON THE MATRIX OF FILAMENTARY SINGLE CRYSTALS OF SILICON

УДК 532.685

И.Н. Лазаренко[1], *Д.А. Коновалов*[2]*, *Н.Н. Кожухов*[2]

[1] АО «Гидрогаз»,
394033, г. Воронеж, Ленинский просп., 160
[2] Воронежский государственный технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14
*e-mail: dmikonovalov@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОКАНАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Введение. Работа систем термостабилизации заключается в охлаждении электроники до необходимой, согласно техническим требованиям, температуры. В некоторых случаях возникает потребность, наоборот, в нагревании отдельных элементов. Использование систем локальной термостабилизации позволяет обеспечивать дополнительное охлаждение или нагрев в случае критических значений температуры окружающей среды [1]. Одним из главных блоков описанной системы является микроканальный теплообменный аппарат с пористыми элементами. Для «увязки» различных режимов работы системы при проектировании или эксплуатации необходимо знать его теплогидравлические параметры при различных режимах работы.

Численное моделирование работы элемента теплообменника. С целью рассмотрения полной конструкции микроканального теплообменного аппарата предлагается подход, заключающийся в проверке адекватности ранее разработанной математической модели [2] на примере расчета одного элемента – пористого ребра. В качестве способа проверки адекватности выбран способ сравнения с существующими математическими моделями, являющиеся основой расчета одного и программных CAE-систем.

Использовав двухтемпературную модель, получены тепловые характеристики ребра. Для обобщения гидравлических характеристик пористого ребра определена зависимость $\xi(\mathrm{Re})$. Определяя перепад давлений для каждого из режимов работы ребра, найдены значения искомых параметров.

Моделирование работы теплообменного аппарата с пористыми ребрами. Основной целью расчета режимных характеристик ТОА являлось определение выходных параметров, влияющих на работу всех узлов системы термостабилизации. Кроме этого, при расчете контролировались критические значения температуры, при которых теплоноситель изменяет свое фазовое состояние или работает нестабильно. При расчете контролировался тепловой баланс МТОА. Разница не превышала 0,9 %. Результаты расчета представлены на рис. 1, 2.

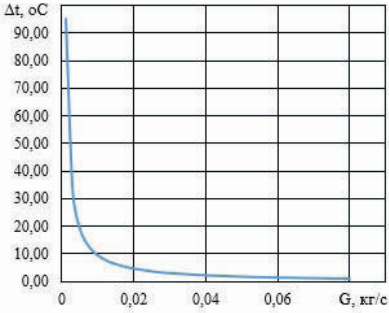


Рис. 1. Зависимость перепада температур на входе и выходе МТОА

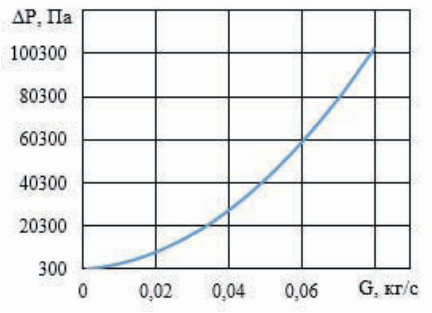


Рис. 2. Зависимость перепада давлений на входе и выходе МТОА

Анализ полученных данных позволяет определить значения расходов и перепадов давления для предотвращения превышения температуры подложки в 80 °С. При $G > 0,03$ кг/с не происходит существенного увеличения Δt. Для расчета остальных узлов системы термостабилизации для различных режимов работы получены значения температуры на выходе из МТОА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства и образования науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы (Соглашение № 14.577.21.0202, уникальный идентификатор RFMEFI57715X0202).

Литература

1. **Коновалов Д.А., Лазаренко И.Н., Кожухов Н.Н., Дроздов И.Г.** Разработка методов интенсификации теплообмена в микроканальных теплообменниках гибридных систем термостабилизации // Вестник ВГТУ. 2016. Т. 12. № 3. С. 21—30.
2. **Ряжских В.И., Коновалов Д.А., Слюсарев М.И., Дроздов И.Г.** Анализ математической модели теплосъема с плоской поверхности ламинарно движущимся хладагентом через сопряженную пористую среду // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS). 2016. Vol. 9. No 3. P. 68—81.

I.N. Lazarenko[1]*, D.A. Konovalov*[2]*, N.N. Kozhukhov*[2]

[1] Joint-stock company «Hydrogas»,
Russia, 394033, Voronezh, Leninsky ave., 160
[2] Voronezh State Technical University,
Russia, 394026 Voronezh, Moskovsky ave., 14

STUDY THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF MICROCHANNEL EXCHANGER

УДК 532.526.2, 536.24

М.С. Макаров[1], *С.Н. Макарова*[1,2], *А.А. Шибаев*[1,2]

[1]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
[2]Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
*e-mail: aleksandr.a.shibaev@yandex.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ В ДВУХКАСКАДНОЙ ТРУБЕ ЛЕОНТЬЕВА С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

Метод газодинамического энергоразделения в сверхзвуковом потоке газовой смеси с малым числом Прандтля является предметом исследования ряда научных школ более десяти лет. Подробно исследовано влияния числа Прандтля и числа Маха на коэффициент восстановления и тепловой поток через разделительную стенку при внешнем обтекании. Исследовано влияние проницаемости стенки и наличие поверхностных интенсификаторов теплообмена на адиабатную температуру стенки и эффективность энергоразделения. В работе [1] впервые экспериментально получен эффект энергоразделения воздуха при сверхзвуковом истечении части потока из сопла с центральной трубкой. Отмечено, что метод энергоразделения в трубе Леонтьева обладает существенным преимуществом по сравнению с другими методами. Охлаждаемая (дозвуковая) часть исходного потока практически сохраняет полное давление при истечении из трубы, при этом температура потока существенно понижается. Это позволяет организовать процесс энергоразделения каскадно.

В данной работе предложена конструкция двухкаскадной трубы Леонтьева с центральным телом, проведено численное моделирование течения и теплообмена в предложенной трубе. На рис. 1 представлена модель двухкаскадной трубы со сдвинутыми критическими сечениями сверхзвуковых сопел.



Рис. 1. Модель двухкаскадной трубы и схема течения: *1* — входной газовый коллектор; *2* — центральный сверхзвуковой канал с критическим сечением (*3*); *4* — центральное тело; *5* — сверхзвуковой канал со сдвинутым критическим сечением (*6*); *7* — дозвуковой канал; *8* — выходной делитель газа; *9* — делительные каналы

Исходный газовый поток поступает во входной коллектор и делится на три части. Первая часть поступает в центральное кольцевое сверхзвуковое сопло и разгоняется до сверхзвуковой скорости (M ≈ 2). Полная температура внешней стенки центрального сопла становится ниже исходной температуры потока (Pr < 1). Вторая часть газа поступает в сверхзвуковое сопло со сдвинутым вниз по потоку критическим сечением. В начале канала эта часть потока охлаждается за счет передачи тепла к газу в центральном канале, далее газ разгоняется за критическим сечением до сверхзвуковой скорости (M ≈ 2). Полная температура внешней стенки второго сопла становится ниже температуры внешней стенки центрального сопла. Третья часть газа с дозвуковой скоростью течет в периферийном кольцевом канале и охлаждается на всей длине трубы. Нагретый и охлажденный газ разделяется в выходном делителе. На рис. 2 приведены данные о степени охлаждения, коэффициенте температурной эффективности и адиабатном КПД процесса энергоразделения в зависимости от относительной доли охлажденного потока при истечении гелий-ксеноновой смеси из ресивера с давлением 7,5 атм и температурой 22 ºС.

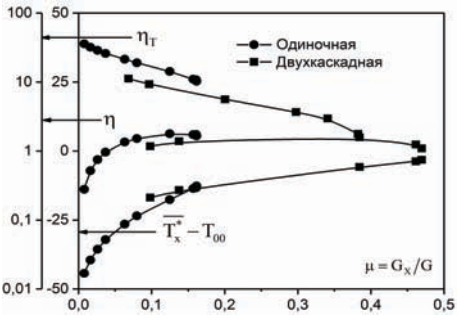


Рис. 2. Параметры эффективности двухкаскадной трубы Леонтьева со сдвинутыми критическими сечениями в сравнении с данными для одиночной трубы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 15-08-04203а.

Литература

1. **Zditovets A.G., Vinogradov Yu.A., Titov A.A.** Experimental investigation of the heat transfer process at a gas-dynamic method of energy separation // Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference (IHTC15), 2014. IHTC15-8965. 16 p.

M.S. Makarov [1], *S.N. Makarova* [1,2], *A.A. Shibaev* [1,2]

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1
[2]Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, SB RAS
Russia, 630090, Novosibirsk, K. Marks ave., 20

NUMERICAL MODELING OF ENERGY SEPARATION IN TWO-CASCADED LEONTIEV TUBE WITH CENTER BODY

УДК 62-135.2

А.А. Мартиросян

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

В работе рассмотрены основные подходы при расчете течения в ступени осевого компрессора в программном коде Ansys CFX.

Изучены основные подходы при моделировании турбулентных течений. В настоящее время выделяют три основных подхода:

- прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation, DNS);
- моделирование крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES);
- моделирование осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS);
- их модификации.

В работе рассматривался третий подход при расчете.

Проведен расчет по средней линии тока, а также на втулочном и периферийном сечениях по методике кафедры Э3 (Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки) МГТУ им. Н.Э. Баумана [1]. Профилирование проводилось по закону постоянной циркуляции (Г = const) [2]. В качестве оценочного параметра наличия отрывных течений использовался фактор диффузорности [3].

На основании трехмерной модели построена структурированная гексаэдрическая сетка в программном комплексе TurboGrid.

Проведен трехмерный расчет ступени в программном коде Ansys CFX с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса для описания турбулентных течений с замыканием данных уравнений разными моделями турбулентности. В работе рассматриваются k-ω, Shear Stress Transport (SST), k-ε, Renormalization Group model (RNG) k-ε, Explicit Algebraic Reynolds Stress Model (EARSM) k-ε модели турбулентности.

Для каждой модели турбулентности с учетом ее особенностей были построены расчетные сетки. В качестве оценочного параметра являлся безразмерный коэффициент y+. В ходе расчета данный коэффициент проверялся. При выходе коэффициента y+ за пределы рекомендаций для рассматриваемой модели турбулентности расчетная сетка перестраивалась.

В качестве граничных условий задавались:

— на входе: полное давление и полная температура, направление потока после ВНА (входного направляющего аппарата);
— на выходе: статическое давление на втулочном сечении исходя из условия радиального равновесия.

Для передачи информации между вращающимся рабочим колесом и неподвижным направляющим аппаратом в Ansys CFX используются «интерфейсы». В нашей работе для стационарного расчета используется интерфейс «stage» (осреднение параметров по окружности).

Анализ сходимости решения осуществлялся в CFX-solver. Рассматривались среднеквадратичное значение по остатку RMS (Root Mean Square), график изменения приведенного расхода, степени повышения полного давления $\pi^*_{ст}$ и адиабатического коэффициента полезного действия $\eta^*_{ст}$. При слабом отклонении этих параметров в течение длительного времени расчет останавливался и анализировался в CFD-Post.

В результате работы была построена характеристика ступени (зависимость $\pi^*_{ст}$ и $\eta^*_{ст}$ от приведенного расхода) для режима относительной частоты вращения $\bar{n} = 1$ для каждой модели турбулентности. Наибольший КПД получен при RNG k–ε модели турбулентности. Максимум по степени повышения полного давления показала модель турбулентности k–ω. Относительно остальных моделей турбулентности средние показатели по степени повышения полного давления и КПД имеет SST модель.

Литература

1. **Бекнев В.С.** Расчет осевого компрессора: методические указания по выполнению курсовых и дипломных проектов / под ред. Р.З. Тумашева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1981.
2. **Бекнев В.С, Михальцев В.Е., Шабаров А.Б., Янсон Р.А.** Турбомашины и МГД-генераторы газотурбинных и комбинированных установок: учеб. пособие для студентов втузов, обучающихся по специальности «Турбиностроение». М.: Машиностроение, 1983. 392 с.
3. **Кампсти Н.** Аэродинамика компрессоров: пер с англ. М.: Мир, 2000.

A.A. Martirosyan

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

RESEARCH OF THE FLOW IN THE FIRST STAGE OF HIGH PRESSURE COPMRESSOR WITH THE USE OF DIFFERENT MODELS OF TURBULENCE

УДК 621.175

О.О. Мильман[1], *С.Н. Ленев*[2], *П.В. Голов*[2], *Б.А. Шифрин*[1], *А.Ю. Картуесова*[1]

[1] ЗАО Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон»,
248010, г. Калуга, ул. Комсомольская Роща, 43
[2] ПАО «Мосэнерго»,
119526, Москва, просп. Вернадского, 101, корп. 3

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУШНО-КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВОК И СУХИХ ГРАДИРЕН ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗНОУРОВНЕВОЙ КОМПОНОВКИ СЕКЦИЙ

Требование к минимизации площади, занимаемой воздушно-конденсационными установками (ВКУ) или сухими градирнями (СГ), зачастую обязывает к многорядному расположению их секций. При этом отдельные секции оказываются расположенными в «теневой» зоне, создается неравномерность по расходам воздуха через различные секции, эффективность ВКУ в целом может снижаться. Ветровые потоки, в условиях которых зачастую работают ВКУ или СГ, могут создавать дополнительные помехи в работе вентиляторов ВКУ и усугублять эту неравномерность [1]. Одним из возможных мероприятий, позволяющих нивелировать этот негативный эффект, является разноуровневое по высоте расположение секций в ВКУ.

Целью работы являлось сравнительное исследование методами численного моделирования процессов совместной работы вентилятора и его сети (теплообменников) при ветровой нагрузке и без нее для двух вариантов трехрядных секций: одно- и разноуровневого. За основу конструкции самих секций принята V-образная компоновка секции [2].

Для выполнения численных расчетов на основе конструкции ВКУ, состоящего из трех рядов секций, были созданы соответствующие расчетные 3D-модели. Рассматривались два варианта компоновки: одноуровневая — все три секции расположены на одном уровне, и разноуровневая, когда передняя и задняя секции расположены выше средней.

При выполнении аэродинамических расчетов было принято, что в каждом ряду по его глубине расположено большое число секций, в связи с чем расчеты выполнялись в 2D-постановке. Каждая секция ВКУ включает в себя вентилятор и два теплообменных модуля, на которые накладывались граничные условия «внутренний вентилятор» и «пористая среда».

В результате расчетов получены массовые расходы по вентиляторам секций при отсутствии ветра и при ветре с разной скоростью, которые представлены на рис. 1.

При одноуровневой компоновке достаточно благополучная картина течения при отсутствии ветра претерпевает серьезные изменения: уже при ветре 3 м/с суммарный расход на три секции уменьшается на ≈ 20 % по от-

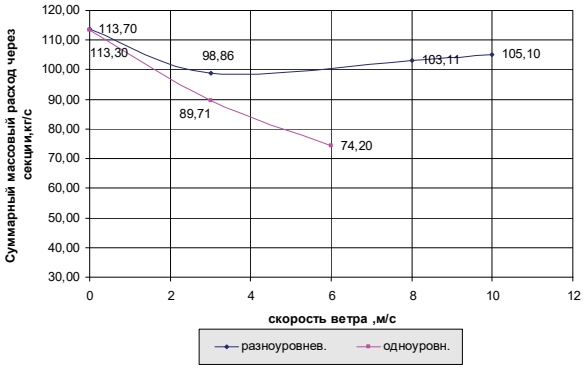


Рис. 1. График зависимости массового расхода от скорости ветра через секции ВКУ для одноуровневой и разноуровневой компоновок

ношению к расходу при отсутствии ветра. При увеличении скорости ветра до 6 м/с общий расход воздуха уменьшается уже на 35 % по отношению к расходу при отсутствии ветра. При двухуровневой компоновке при ветре 3 м/с суммарный по трем секциям расход воздуха также уменьшается, но слабее, чем в одноуровневой компоновке (на ≈13 %). Расход воздуха, достигнув минимума при 3—4 м/с, постепенно увеличивается, и при ветре 10 м/с составляет уже 92,5 % расхода при отсутствии ветра.

Подводя итоги выполненных расчетов, можно заключить, что разноуровневая компоновка по всем показателям более предпочтительна, чем одноуровневая.

Литература

1. **Жинов А.А., Шевелев Д.В.** Исследование влияния ветра на производительность вентиляторов воздушно-конденсационной установки геотермальной электрической станции // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2015. № 1. С. 108—118.
2. **Мильман О.О., Фёдоров В.А.** Воздушно-конденсационные установки. М.: Издательство МЭИ, 2002. 208 с.

O.O. Milman[1], *S.N. Lenev*[2], *P.V. Golov*[2], *B.A. Shifrin*[1], *A.Y. Kartuesova*[1]

[1]Joint Stock Scientific Production Company «Turbocon»,
Russia, 248010, Kaluga, Komsomolskaya Roscha str., 43
[2] PJSC «Mosenergo»,
119526, Moscow, Vernadskiy ave., 101, Bldg. 3

APPLICATION OF THE SPLIT - LEVEL LAYOUT SECTIONS FOR IMPROVING EFFICIENCY OF THE AIR-CONDENSING UNITS AND THE DRY COOLERS

УДК 621.175

О.О. Мильман, А.В. Птахин*

ЗАО «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон»,
248010, г. Калуга, ул. Комсомольская роща, 43

*e-mail: turbocon@kaluga.ru

ПЕРЕМЕННЫЕ И ПУСКОВЫЕ РЕЖИМЫ ВОЗДУШНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Воздушно-конденсационные установки (ВКУ) находят все более широкое применение в энергетике ввиду роста дефицита охлаждающей воды и ужесточения экологических требований. В связи с этим анализ их работы, в частности пусковых и переменных режимов, является актуальной научно-технической задачей.

Особенности ВКУ по сравнению с поверхностными водоохлаждаемыми конденсаторами (КП) обусловливаются следующими факторами:

-общая оребренная поверхность теплообмена ВКУ на три порядка больше, чем у КП;

-объем вакуумной системы ВКУ в 6—10 раз больше, чем у КП;

-коэффициент теплопередачи ВКУ на два порядка меньше, а приведенный к поверхности конденсации – в 5—10 раз меньше, чем у КП;

-пуск ВКУ при отрицательных температурах наружного воздуха требует большего времени и затрат тепловых мощностей.

В связи с этим можно ожидать, что режимы работы ВКУ будут в большей степени определяться процессом теплоотвода со стороны охлаждающего воздуха, чем со стороны конденсирующегося пара, как это имеет место в поверхностных конденсаторах.

Для получения количественных характеристик работы натурной секции ВКУ, расположенной на площадке Всероссийского теплотехнического института, проведены ее тепловые испытания на номинальном и переменных режимах.

Натурная секция предназначена для проведения исследований, а затем для тиражирования ее в составе ВКУ.

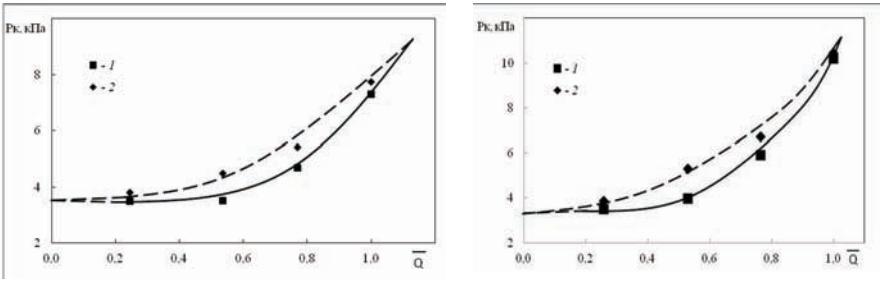
На данном стенде проведены три цикла испытаний:

- при переменных расходах воздуха $G_{вз}$ и тепловой нагрузке Q = const;

- при переменных теплосъемах Q и постоянном расходе воздуха $G_{вз}$;

- при подаче дополнительного воздуха $G_д$ в пар и $G_{вз}$ = const, Q = const.

Кроме того, были определены «нулевые точки», т.е. достижимое давление в ВКУ при отсутствии тепловой нагрузки при нескольких значениях температуры охлаждающей воды на входе в водоструйные эжекторы и вакуумный водокольцевой насос.



а) *б*)

Рис. 1. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных переменных режимов: *а* — $G_в$ = 550—575 тыс.м^3/ч; *б* — $G_в$ = 465 тыс. м^3/ч; ♦ — расчет, ■ — эксперимент

Выводы

Испытания опытной натурной секции ВКУ [1] на переменных режимах подтвердили высокую эффективность ее работы: в расчетном режиме коэффициент теплопередачи составил 39—40 Вт/(м^2·К), что значительно выше, чем у мировых аналогов.

При значениях тепловой нагрузки в интервале 0,6—1,0 номинальной коэффициент теплопередачи изменяется в пределах 5—7 %, что подтверждает рациональное распределение поверхности теплообмена между ходами конденсатора по пару.

Для компенсации негативного влияния присосов воздуха, а также увеличения скорости набора вакуума во время пуска производительность воздухоудаляющих устройств ВКУ должна в 2—3 раза превысить эти показатели для водоохлаждаемого конденсатора.

Расчет переменных режимов ВКУ по методике [2] дает удовлетворительные результаты по учету влияния переменной тепловой нагрузки, присосов воздуха и характеристик воздухоудаляющих устройств (рис. 1 *а*, *б*).

Литература

1. **Результаты** экспериментальных исследований характеристик воздушных конденсаторов паротурбинных установок / В.А. Федоров, О.О. Мильман, Н.В. Колесников и др. // Теплоэнергетика. 2013. № 2. С. 35—41. DOI: 10.1134/S00403636/300021.
2. **Шкловер Г.Г., Мильман О.О.** Исследования и расчет конденсационных установок паровых турбин. М.: Энергоатомиздат, 1985.

O.O. Milman, A.V. Ptakhin

Joint Stock Scientific Production Company «Turbocon»,
Russia, 248010, Kaluga, Komsomolskaya Roscha str., 43

VARIABLE AND STARTING OPERATION MODES OF AIR-COOLED CONDENSERS

УДК 621.45.035

В.В. Миронов, Л.И. Волкова, Н.Н. Волков, С.К. Добриянов, В.Н. Баскаков, А.И. Турутько

Государственный научный центр Российской Федерации — Исследовательский центр имени Келдыша,
125438, Москва, ул. Онежская, 8

e-mail: superplume@mail.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ С УЧЕТОМ ТЕЧЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ ПЛЕНКИ ОКСИДА КРЕМНИЯ

В настоящее время перспективным направлением в конструкции ракетных двигателей является использование композиционных материалов на основе углерода для изготовления сопловых насадков. Основной проблемой этих материалов является стойкость в высокоокислительной среде при длительном времени работы (до1500 с) и температуре конструкции до 2000 К.

Одним из способов повышения стойкости этих материалов является введение в них карбида кремния в виде покрытия. В процессе окисления карбида кремния образуется пленка диоксида кремния, которая служит диффузионным барьером для окисляющих компонентов. Эта пленка плавится и испаряется, а получившийся расплав течет, что влияет на общий процесс.

Процесс окисления материала включает в себя пять стадий:

1) перенос окислителя на поверхность пленки;
2) диффузия окислителя;
3) взаимодействие на поверхности SiC и окислителя;
4) перенос продуктов реакции (например, CO) через пленку;
5) отток газа от поверхности.

В данной методике рассматривается задача расчета прогрева и разрушения углеродного тела с покрытием из карбида кремния, в рамках которой для каждого шага по времени решается двумерная тепловая задача при известных толщине пленки, скоростях течения и испарения пленки диоксида кремния, а затем для получившейся температуры находят величины испарения, течения и скорости нарастания пленки. В рамках данной методики проведен численный расчет. Полученные результаты расчетов были сверены с данными экспериментов.

Литература

1. **Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б.** Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
2. **Исследование** поведения конструкционного материала с высоким содержанием карбида кремния в различных газовых средах при высоких температурах /

В.И. Елчин, Б.В. Лукин, А.Е. Раутборт и др. // Материалы для канала МГД-генератора. М., Наука, 1969.
3. **Процессы** в гибридных ракетных двигателях / под ред. А.С. Коротеева. М.: Наука, 2008.
4. **Jorgensen P.J.** Effects of oxygen partial pressure on oxidation of SiC // Ibid. 1960. Vol. 43. No 4. P. 209—212.
5. Справочник: Коррозия конструкционных материалов. Т. 1. М.: Интермет инжиниринг, 2000.
6. **Jacobson N.S.** Corrosion of silicon-based ceramics in combustion environments // J.American Ceramic Society. 1993. 76. 3—28.
7. **Бояринцев В.И., Звягин Ю.В.** Исследование разрушения углеграфитовых материалов при высоких температурах // Теплофизика высоких температур. 1975. Т. 13. № 5.
8. **Термодинамические** свойства индивидуальных веществ / В.П. Глушко, Л.В. Гурвич и др. М.: Наука, 1978.
9. **Самарский А.А.** Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 616 с.
10. **Горский В.В., Гордеев А.Н., Дудкина Т.И.** Аэротермохимическая деструкция карбида кремния, омываемого высокотемпературным потоком воздуха // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 5.
11. **Александров О.В., Дусь А.И.** Модель термического окисления кремния на фронте объемной реакции // Физика и техника полупроводников. 2008. Т. 42. Вып. 11.
12. **Горский В.В.** Теоретические основы расчета абляционной тепловой защиты. М.: Научный мир, 2015.

V.V. Mironov, N.N. Volkov, L.I. Volkova, S.K. Dobriyanov,
V.N. Baskakov, A.I. Turutko

The State scientific centre of Russian Federation – federal state unitary enterprise
«Research centre named after M.V. Keldysh»
Russia, 125438, Moscow, Onezhskaya str., 8

METHOD OF CALCULATION OF THERMAL STATE OF C/SIC COMPOSITES TAKING INTO ACCOUNT FLOW AND EVAPORATION OF SIO2 FILM

УДК 621.436

*М.О. Мисник, А.М. Неволин, Л.В. Плотников**

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

*e-mail: plotnikovlv@mail.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ ВПУСКНОЙ СИСТЕМЫ ДВС НА ГАЗОДИНАМИКУ И ТЕПЛООБМЕН НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

Известно, что от газодинамического совершенства впускных систем зависит эффективность работы поршневых ДВС [1—3]. Основное направление улучшения показателей качества газообмена состоит в снижении гидравлического сопротивления за счет стабилизации потока и нивелирования влияния отрывных зон на течение газов во впускной системе. При этом другой важной задачей в области двигателестроения является исследование теплообмена во впускной системе, поскольку от величины подогрева воздуха в процессе впуска зависит массовое наполнение цилиндра.

Известно [4, 5], что в трубопроводах с поперечными сечениями в форме квадрата или треугольника возникают устойчивые вихревые структуры (вторичные течения), которые стабилизируют основное течение, препятствуя образованию обратных волн давления, а также оказывают влияние на области отрывных течений, сокращая площадь последних.

В данной статье представлены результаты численного моделирования газодинамики и теплообмена во впускных системах разной конфигурации применительно к поршневым двигателям.

Для исследования структуры и теплообмена потока при течении газа в трубах с разными конфигурациями был разработан ряд численных моделей на базе программного комплекса STAR-CCM+. В качестве рабочей среды использовался сухой воздух, двигающийся в турбулентном режиме со средней скоростью в диапазоне от 10 до 100 м/с. На входе в модель задавался массовый расход, выход определялся как выход под давлением, равным барометрическому. Для моделирования турбулентного течения использовалась k-е модель турбулентности. Задача решалась в стационарной постановке.

Показано, что поперечное профилирование впускного трубопровода оказывает существенное влияние на структуру течения газов в системе впуска и на входе в цилиндр двигателя. В частности, наблюдается сокращение отрывных зон в областях, расположенных за втулкой клапана и в районе клапанной щели, при этом наиболее ярко выраженный эффект наблюдается для впускной системы с трубопроводом с треугольным участком.

Установлено, что использование во впускной системе профилированных участков приводит к снижению интенсивности теплоотдачи (до 15 %) при скоростях потока воздуха до 40 м/с и росту интенсивности теплоотдачи до 5 % при высоких скоростях (рис. 1). Данные эффекты должны положительно сказаться на наполнении цилиндра воздухом и, соответственно, привести к улучшению технико-экономических показателей поршневых двигателей внутреннего сгорания.

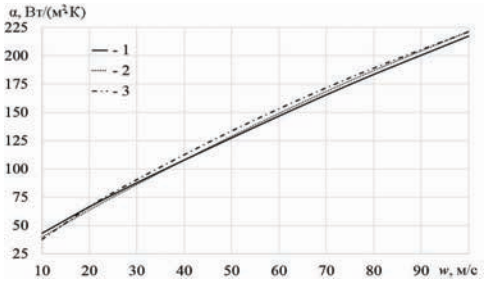


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от скорости потока воздуха *w* во впускном трубопроводе разной конфигурации: *1* — круг; *2* — квадрат; 3 — треугольник

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00118 А).

Литература

1. **Драганов Б.Х. Круглов М.Г., В.С. Обухова.** Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания. К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. 175 с.
2. **Вихерт М.М., Грудский Ю.Г.** Конструирование впускных систем быстроходных дизелей. М.: Машиностроение, 1982. 151 с.
3. **Совершенствование** процессов в газовоздушных трактах поршневых двигателей внутреннего сгорания: монография / Б. П. Жилкин и др.; под общ. ред. Ю.М. Бродова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 228 с.
4. **Кутателадзе С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
5. **Идельчик И. Е.** Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). М.: Машиностроение, 1983. 351 с.

M.O. Misnik, A.M. Nevolin, L.V. Plotnikov

FSAEI of HPE «Ural Federal University
named after the first President of Russia B.N. Yeltsin»,
Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19

EVALUATION OF IMPACT OF THE CONFIGURATION OF INTAKE SYSTEM OF ICE ON GAS DYNAMICS AND HEAT TRANSFER BY NUMERICAL SIMULATION IN STEADY-STATE CONDITIONS

УДК 536.1

В.Ю. Митяков, А.А. Гусаков, А.В. Митяков, В.В. Сероштанов, А.В. Башкатов, А.Н. Дымкин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

АЭРОДИНАМИКА ПРОФИЛЯ С ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ В ВИДЕ СФЕРИЧЕСКИХ ЛУНОК

Исследованы характер обтекания и аэродинамические характеристики для крыловидного профиля с рельефом в виде сферических лунок-интенсификаторов. Предложена новая методика для оценки аэродинамического сопротивления, исключающая применение традиционных весов. Показано соответствие полученных результатов данным литературы, Выявлены режимы, где применение лунок-интенсификаторов улучшает обтекание профиля.

Литература

1. **Сапожников С.З, Митяков Ю.В., Митяков А.В.** Основы градиентной теплометрии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 203 с.
2. **Жильцов П.Д., Никитин Н.С.** На пути к совершенствованию авиационной техники [Текст] // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2013. №6 (192). С. 114—117.

V.Y. Mityakov, A.A. Gusakov, A.V. Mityakov, V.V. Seroshtanov, A.V. Bashkatov, A.N. Dymkin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnichnichrskaya str., 29

PROFILE AERODYNAMICS WITH INTENSIFIERS IN THE FORM OF SPHERICAL DIMPLES

УДК 532.542

Е.И. Михиенкова[1], *П.А. Необъявляющий*[1], *С.А. Филимонов*[2], *Д.В. Бойков*[2]

[1]Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[2]ООО «ТОРИНС»,
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

ИССЛЕДОВАНИЕ И АДАПТАЦИЯ СИСТЕМЫ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В работе исследована система горячего водоснабжения промышленного предприятия методом численного моделирования.

Была проведена настройка существующих моделей систем горячего водоснабжения к реально существующему состоянию на сегодняшний день. Стоит отметить, что в рамках адаптации модели сам математический аппарат остался неизменным, проводилось уточнение отдельных характеристик системы и добавление ряда объектов [1]. Было проанализировано влияние теплопроводности изоляции, гидравлических сопротивлений элементов сети. Для реализации расчета был использован программный комплекс SigmaNet [2], разработанный сотрудниками ООО «ТОРИНС» и Института теплофизики. Программный продукт предназначен для расчета потокораспределения в технологических трубопроводах при помощи моделей, основанных на теории гидравлических цепей [3].

Первым направлением адаптации сетевой модели системы ГВС было выставление циркуляционных расходов на концевых контурах и подбор коэффициента изоляции для различных участков. Вторым направлением был подбор сопротивлений циркуляционных колец с целью восстановления температуры и расходов на концевых участках и подбор. Проведены тесты.

В первом тесте было определено влияние изменения сопротивления одного участка на распределение температур по системе в целом. Переход работы в такой режим работы оказывает сильное влияние на распределение температуры горячей воды по системе ГВС. У потребителей, находящихся на одном с исследуемым корпусом циркуляционном контуре, температура растет, а у остальных падает.

Для оценки качества теплоизоляции было проведено два дополнительных расчета, в которых коэффициент теплопроводности изоляции изменялся в два раза в большую и меньшую стороны. Как оказалось, качество теплоизоляции оказывает сильное влияние на систему ГВС.

В процессе адаптации сетевых моделей к реальным условиям были выявлены некоторые проблемы. Часть параметров моделей не может быть опре делена аналитически или с помощью справочной информации. Основным таким параметром является коэффициент теплопроводности тепловой

изоляции, который зависит от условий эксплуатации и меняется с течением времени. Определение таких параметров возможно только на основе эксперимента. Однако, несмотря на выявленные проблемы, результаты адаптации сетевых моделей систем энергоснабжения на основе данных измерений и телеметрии показывают,что разработанные модели адек ватно описывают текущие состояния исследуемых систем энергоснабжения предприятия и пригодны для расчета перспективных схем.

Литература

1. **Михиенкова Е.И., Необъявляющий П.А., Бойков Д.В., Филимонов С.А.** Разработка математической модели процессов передачи, распределения и потребления энергоресурсов (энергопотоков) промышленным производством // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену, 23—26 мая 2016 г.: тезисы докладов и сообщений. С. 363—367.
2. **Филимонов С. А., Дектерев А. А., Бойков Д. В.** Использование комплексного подхода при исследовании и оптимизации режимов работы систем газоходов. // Трубопроводные системы энергетики: Методические и прикладные проблемы моделирования. 2015.
3. **Меренков А.П., Хасилев В.Я.** Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985.

E.I. Mihienkova[1], *P.A. Neobyavlyayuschiy*[1], *S.A. Filimonov*[2], *D.V. Boykov*[2]

[1] Siberian Federal University,
Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodnyi ave., 79
[2] OOO «TORINS»,
Russia, 660036, Krasnoyarsk, Academgorodok, 50/44

STUDY AND ADAPTATION THE HOT WATER SUPPLY OF INDUSTRIAL PRODUCTION

УДК 536.2

*А.В. Моржухина**

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4

*e-mail: vixum@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАПОРИСТЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В настоящее время с растущим интересом к межпланетной пилотируемой космонавтике все острее встает вопрос надежной тепловой защиты спускаемых аппаратов. С одной стороны, теплозащитное покрытие летательного аппарата должно обладать необходимыми прочностными и теплофизическими свойствами, с другой, иметь минимальный вес, тем самым обеспечивая возможность увеличить массу полезной нагрузки.

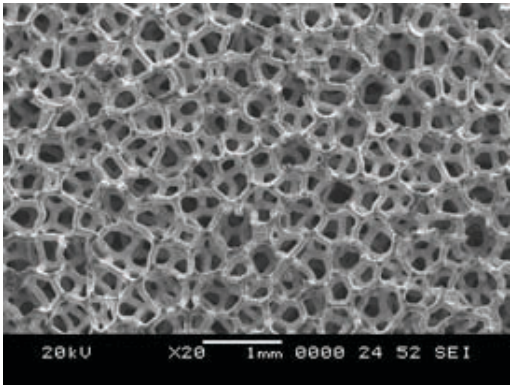


Рис. 1. Структура ультрапористого ячеистого стеклоуглерода RVC

С этой точки зрения наиболее перспективными материалами для подобных приложений остаются ультрапористые композиционные материалы на основе материалов из супертонких волокон SiO_2, Al_2O_3, TaO_2, ZrO_2, MgO и др. [1].

Благодаря своим свойствам новые композиционные материалы на основе углеродной пены и вспененного стеклоуглерода (RVC) (рис. 1) являются перспективными материалами с широким спектром применений в различных отраслях техники [2].

В частности, для объектов ракетно-космической техники особый интерес эти материалы представляют в качестве конструкционных, теплоизоляционных и теплозащитных материалов при создании конструкций, работающих в экстремальных условиях.

Такие материалы обладают удачным сочетанием следующих основных положительных свойств:

- высокой пористостью и низкой объемной плотностью;
- относительно высокой прочностью;

• высокой термостойкостью и жаропрочностью;

• хорошими теплоизоляционными свойствами в широком диапазоне температуры.

Следует отметить, что свойства этих материалов в значительной степени зависят от их структуры, исходного сырья, технологии производства и используемых модификаторов, улучшающих эти свойства или обеспечивающих получение заданных свойств. Все это позволяет создавать на основе RVC композиционные материалы и конструкции различного функционального назначения с заданными свойствами.

Представленная работа посвящена исследованию свойств подобного класса материалов. Разработана адекватная математическая модель, описывающая процессы радиационно-кондуктивного теплообмена в образце материала, подтвержденная экспериментальными исследованиями.

Литература

1. **Алифанов О.М., Черепанов В.В.** Методы исследования и прогнозирования свойств высокопористых теплозащитных материалов. М: МАИ, 2014. 264 с.
2. **Алифанов О.М., Черепанов В.В., Моржухина А.В.** Математическое моделирование ультрапористых неметаллических сетчатых материалов // ИФЖ. 2015. Т. 88. № 1. С. 133—144.

A.V. Morzhukhina

Moscow aviation institute (national research university),
Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoe sh., 4

EXPERIMENTAL AND MATHEMATICAL RESEARCH ON ULTRA-POROUS THERMAL PROTECTION MATERIALS WITH AEROSPACE APPLICATION

УДК 621.039.5

А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.В. Питык, С.В. Рагулин

Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского
249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ НА НАКОПЛЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ БОРНОЙ КИСЛОТЫ В РЕАКТОРЕ ВВЭР В СЛУЧАЕ АВАРИИ

В рамках концепции безопасности проекта «ВВЭР-ТОИ» особое внимание уделяется вопросам, связанным с накоплением и кристаллизацией борной кислоты в активной зоне при запроектных авариях с разрывом главного циркуляционного контура (ГЦК) и потерей всех источников переменного тока в течение 72 ч. Обеспечение автономности реактора при аварийном процессе обусловливается функционированием пассивных систем безопасности (ПСБ), которые обеспечивают охлаждение активной зоны (АЗ) за счет последовательной подачи в реактор раствора борной кислоты с концентрацией 16 г/кг из гидроемкостей первой (ГЕ-1), второй (ГЕ-2) и третьей ступеней (ГЕ-3). Помимо этого, необходимо учитывать поступление в реактор конденсата из парогенераторов трех неаварийных петель, переводимых в аварийный режим работы за счет функционирования системы пассивного отвода тепла (рис. 1)

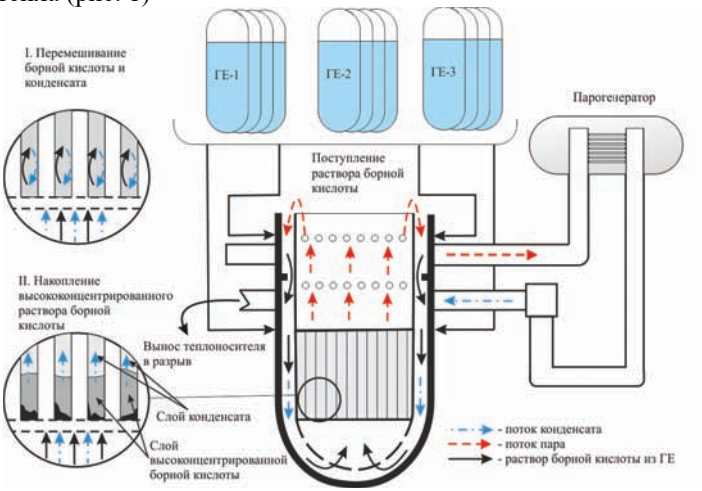


Рис. 1. Схема движения борной кислоты в РУ ВВЭР-ТОИ при запроектных авариях с разрывом ГЦК

Активная зона в это время находится в состоянии кипения, поэтому, учитывая малую концентрацию кислоты в паровой фазе, возможно увеличение количества борной кислоты в теплоносителе активной зоны и достижение условий ее кристаллизации на наружной поверхности твэлов, что может привести к ухудшению теплоотвода. Предельная концентрация раствора борной кислоты, соответствующая началу кристаллизации, зависит от температуры.

Для оценки влияния концентрации борной кислоты в системе ГЕ-3 на ее накопление в активной зоне был проведен расчет изменения концентрации H_3BO_3 при аварийном процессе в реакторной установке ВВЭР.

При проведении расчета были сделаны следующие консервативные допущения: борная кислота рассматривается как единственная форма накопления бора, унос борной кислоты за счет растворимости в паре отсутствует. Давление в системе принималось постоянным и равным 0,3 МПа в течение всего аварийного процесса. В расчете рассматривались варианты снижения концентрации H_3BO_3 в системе ГЕ-3 до 1, 2, 4 и 8 г/кг.

Результаты расчетного анализа показывают, что при аварии происходит достаточно интенсивное накопление борной кислоты в активной зоне реактора. Необходимо отметить, что по достижении 24 часов аварийного процесса концентрация борной кислоты в активной зоне составляет ~311 г/кг и не достигает предела растворимости. Кроме того, очевидна зависимость интенсивности накопления H_3BO_3 от концентрации кислоты в системе ГЕ-3. При концентрации кислоты, равной 1 г/кг, превышения предельной концентрации H_3BO_3 практически не происходит, и, соответственно, существенно снижается риск ее кристаллизации на элементах внутрикорпусных устройств.

Материалы тезисов доклада подготовлены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10649).

A.V. Morozov, D.S. Kalyakin, A.V. Pityk, S.V. Ragulin

State Scientific Center of the Russian Federation –
Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky,
Russia, 249033, Obninsk, Bondarenko sq., 1

INFLUENCE OF THE CHARACTERISTICS OF THE ADDITIONAL CORE FLOODING SYSTEM ON ACCUMULATION AND CRYSTALLISATION OF BORIC ACID IN VVER REACTOR IN CASE OF AN ACCIDENT

УДК 62-832

В.А. Мунц[1], *Ю.В. Волкова*[1,2]*, *М.И. Ершов*[1], *Н.С. Плотников*[1,2]

[1] Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
[2] ООО «Уральская производственная компания»,
620109, г. Екатеринбург, ул. Крауля, 2
*e-mail: gibridsofc@gmail.com

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПАРОВОГО РИФОРМЕРА ПРИРОДНОГО ГАЗА, МНОГОПОТОЧНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА И БАТАРЕЙ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время энергетика нуждается в высокоэффективных и экологически безопасных источниках как электрической, так и тепловой энергии. Поэтому разработки в области создания и совершенствования энергетических установок на базе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) является одной из важнейших задач. Как правило, в таких системах батареи топливных элементов работают на синтез-газе, полученном путем паровой конверсии природного газа, поскольку в таком случае потенциально можно достичь наибольшего КПД системы по низшей теплоте сгорания природного газа (до 90 %) путем использования выделяющейся в системе теплоты для компенсации теплового эффекта эндотермической реакции $CH_4+H_2O = CO+3H_2$.

Для совершенствования тепловых схем энергетических установок на ТОТЭ с паровым риформингом природного газа, необходимо выполнять расчет теплового баланса для различных конфигураций элементов системы, расходов энергоносителей и прочих условий эксплуатации [1, 2].

В статье приведены описание схемы энергетической системы и параметры проведения экспериментов, а также результаты проведенных экспериментов.

Статья содержит математическую модель для совместного расчета тепловой и электрической части энергетической системы, включающей паровой риформер природного газа, многопоточный теплообменник, каталитическую горелку-дожигатель и четыре батареи твердооксидных топливных элементов. Данная модель включает в себя девять уравнений с девятью неизвестными, среди которых температуры в восьми контрольных точках установки, а также сила тока топливной батареи. Верификация математической модели была проведена на основании экспериментальных данных испытания энергетической установки номинальной мощностью 5 кВт в четырех установившихся режимах работы: 40 % использования мощности ТОТЭ

(2 кВт), 60 % (3 кВт), 90 % (4,5 кВт) — пиковом режиме 110 % (5,4 кВт) номинальной мощности при отношении $H_2O:CH_4 = 3$.

Расчет энергетического баланса системы был выполнен на основании разработанной математической модели. Анализ режимов работы установки показал, что с ростом нагрузки КПД установки η_{SOFC} монотонно падает, а потери через ограждения q_5 растут. Во время испытаний в зависимости от режима плотность тока изменялась от 0,1 до 0,25 А/см^2, максимальная плотность тока наблюдалась для 4 режима при максимальной нагрузке. Достаточно невысокое значение плотности тока при экспериментах объясняется применением твердооксидных топливных элементов планарной конструкции с несущим анодным электродом, они работают при более низких температурах, что позволяет существенно снизить стоимость энергомодуля за счет применения более дешевых материалов.

Литература

1. **Chang T.G., Lee S.M., Ahn K.Y., Kim Y.** An experimental study on the reaction characteristics of a coupled reactor with a catalytic combustor and a steam reformer for SOFC systems // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. 3234—3241.
2. **Analysis** of solid oxide fuel cell system concepts with anode recycling / R. Peters, R. Deja, L. Blum et al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38. 6809—6820.

V.A. Munts[1], *J.V. Volkova*[1,2], *M.I. Ershov*[1], *N.S. Plotnikov*[1,2]

[1] Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19

[2] UIC, LLC,
Russia, 620109, Ekaterinburg, Kraula str., 2

ENERGY BALANCE CALCULATION OF A SYSTEM COMPRISING A NATURAL GAS STEAM REFORMER, MULTIFLOW HEAT EXCHANGER AND FUEL CELL STACKS

УДК 621.9

Д.О. Онищенко, А.С. Голосов, Р.Е. Буданов, А.О. Басов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВУХТАКТНОГО КАРБЮРАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Экспериментальные исследования поршневых двигателей являются неотъемлемой частью работ по повышению их эффективности. Равно как и для верификации математических моделей натурные испытания двигателей необходимы. В данной работе отражены результаты испытаний двигателя Stels GK2E74QMR-2 на гидравлическом стенде SuperFlow SF902 в лаборатории НОЦ «Поршневое двигателестроение и спецтехника» (рис. 1). Проведено сравнение выпускных систем различных производителей. Сделаны выводы об особенностях работы двухтактных двигателей.

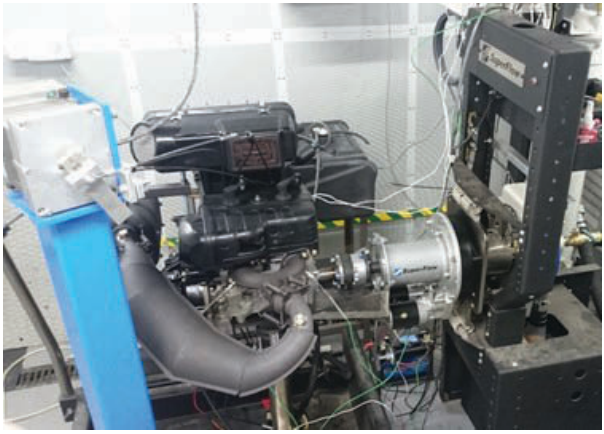


Рис. 1. Испытательный стенд

Целью работы является определение эффективных и индикаторных показателей двигателя, а также измерение других величин, определяющих газодинамические процессы во впускном и выпускном трактах. К ним относятся: эффективные мощность и крутящий момент, индикаторное давление (в том числе и при прокрутке двигателя без сгорания), давление в картере, давление в выпускном коллекторе, температура воздуха на входе в двигатель и во впускном канале, температура отработавших газов, температура стенок выпускного коллектора и резонатора, температура крышки цилиндра в свечном отверстии, массовый расход воздуха и топлива, угол опережения зажигания Для измерений показаний датчиков в соответствии с углом поворота коленчатого вала на двигатель установлен угловой отметчик компании

AVL. Для установки двигателя на стенд изготовлена сварная листовая конструкция, соединяющая картер двигателя с фланцем нагрузочного устройства.

На рис. 2 показаны несколько замеров ВСХ, номер кривой соответствует порядковому номеру измерения. По результатам проведенной работы делаются следующие выводы:

- проведен комплекс работ по экспериментальному исследованию рабочего процесса двухтактного двигателя;
- проведено сравнение различных выпускных систем;
- измеренные величины могут быть использованы для получения верифицированной математической модели двигателя.

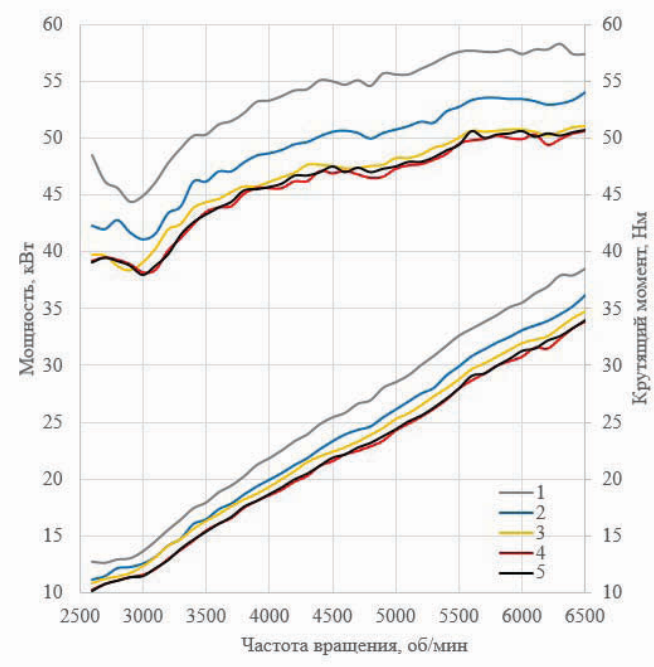


Рис. 2. Внешняя скоростная характеристика

D.O. Onishchenko, A.S. Golosov, R.E. Budanov, A.O. Basov

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-nd Baumanskaya, 5

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WORKING PROCESS OF TWO-STROKE ENGINES

УДК 621.432.3

*Д.О. Онищенко, И.А. Корженевская**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5

*e-mail: ivanessance@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В МОТОРНОМ ОТСЕКЕ АВТОМОБИЛЯ

В настоящее время вопрос повышения эффективности касается всех систем проектируемого автомобиля, однако основной интерес вызывает влияние потока воздуха на температурное состояние и работу компонентов в моторном отсеке. Организация воздушного потока в подкапотном пространстве автомобиля вносит значительный вклад в процесс теплообмена между корпусными элементами, а также компонентами двигателя и окружающей средой. В данной работе проведены исследования в области оптимизации воздушного потока в моторном отсеке, позволяющие снизить температурную нагрузку, а также повысить эффективность двигателя за счет снижения температуры впускного воздуха и термических нагрузок на основные компоненты.

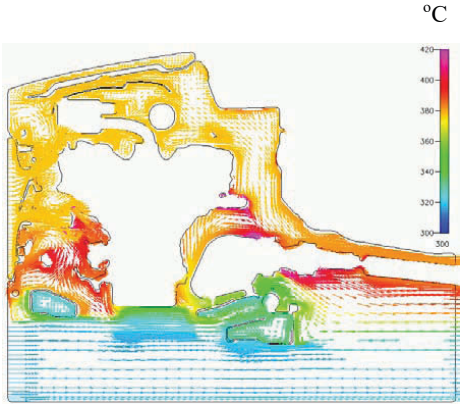


Рис. 1. Тепловые потоки в подкапотном пространстве

Задача исследования заключается в определении оптимального значения локальных скоростей и направления движения потока в расчетной области (подкапотном пространстве) с целью интенсификации теплоотдачи от отдельных компонентов с одновременным снижением газодинамических потерь и рациональной топологии моторного отсека.

В статье рассмотрены наиболее эффективные способы оптимизации и исследования потоков воздуха в моторном отсеке с применением 3D-CFD-кодов [1]. Кроме того, было проанализировано влияние воздушного потока на систему охлаждения с целью повышения эффективности охлаждения пакета радиатора [2], а также для определения температурных полей в моторном отсеке (рис. 1) были рассмотрены три основных случая: холостой ход, движение на подъем при 40 км/ч и при максимальной скорости движения автомобиля.

Список литературы

1. **Gondipalle, Sreekanth Reddy.** CFD analysis of the under hood of a car for packaging considerations // All Theses. 2011. Paper 1183.
2. **Biswadip S., Vinod K., Ranganath K.S.V., Gyan A.** CFD prediction to optimize front end cooling module of a passenger vehicle // International Refrigeration and Air Conditioning Conference. 2006. Paper 845.

D.O. Onishchenko, I.A. Korzhenevskaya

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Bauman str., 5

RESEARCH OF HEAT-MASS TRANSFER IN CAR'S ENGINE COMPARTMENT

УДК 621.9

Д.О. Онищенко, Р.А. Сафонов, Г.А. Арутюнян

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-ая Бауманская, 5

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ ДВС

В данной работе проведено математическое моделирование термоэлектрического генератора с помощью аналитической расчетной модели, которая позволяет оценить основные выходные параметры термоэлектрического генератора. Затем проведено сравнительное математическое моделирование различных конструкций внутренней части горячего теплообменника с помощью программного комплекса для расчетов методом конечных объемов Flow Simulation. Исходные данные для моделирования берутся из аналитического расчета двигателя ВАЗ 21127. На рис. 1—3 приведены эпюры распределения температур на поверхности, в продольном сечении ТЭГ и давления по всей длине ТЭГ.



Рис. 1. Распределение температур в продольном сечении

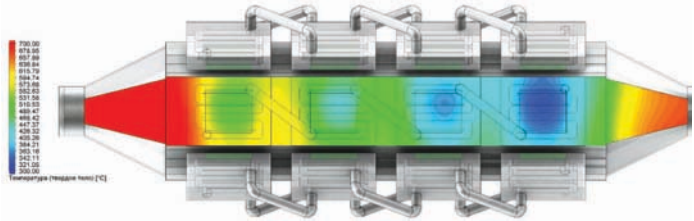


Рис. 2. Распределение температур на поверхности

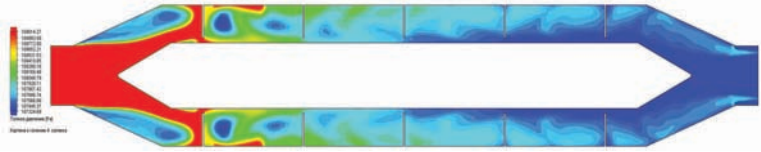


Рис. 3. Распределение давления по длине термоэлектрогенератора

Для верификации расчетной модели было проведено ряд экспериментов с использованием двигателя ВАЗ 21127 и нагрузочного стенда Super Flow для имитации нагрузки на двигатель (рис. 4).



Рис. 4. Испытательный стенд

Литература

1. **Онищенко Д.О.** Улучшение эффективных и экологических показателей дизеля и снижение тепловых нагрузок на его основные детали: Дисс… д-ра техн. наук. М., 2013. 234 с.
2. **Кавтарадзе Р.З.** Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.

D.O. Onishchenko, R.A. Safonov, G.A. Arutyunyan

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

VERIFICATION OF THE CALCULATION MODEL OF A THERMOELECTRIC GENERATOR FOR LONG-TERM USE IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE.

УДК 536.244

Д.А. Онохин, Э.Н. Сабуров*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
163002, г. Архангельск, Наб. Северной Двины, 17

*e-mail: onokhin-arh@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ОТНОСИТЕЛЬНО ДЛИННЫХ ЦИКЛОННЫХ КАМЕРАХ

Закрученные высокотурбулентные потоки теплоносителей находят все большее применение в современной технике для интенсификации технологических и тепломассообменных процессов, создания новых конструкций различных по назначению аппаратов и устройств с высокой производительностью и энергоэффективностью. Все это вызывает необходимость исследования особенностей конвективного теплообмена в закрученных потоках, создаваемых в рабочем объеме камер большой относительной длины.

Целью работы являлось изучение особенностей конвективного теплообмена в циклонной камере большой относительной длины при различных условиях ввода и вывода потока и разработка рекомендаций для практического использования.

Исследование выполнено на экспериментальном стенде, основным элементом которого являлась секционированная циклонная камера с разносторонним вводом и выводом газов, диаметром рабочего объема $D_к$ = 160 мм и длиной 2040 мм. Подвод воздуха в закручиватель камеры осуществляли тангенциально с диаметрально противоположных сторон двумя входными каналами (шлицами). Безразмерную площадь поперечного сечения входных каналов $\bar{f}_{вх} = 4 f_{вх} / \pi D_к^2$ (площадь входа потока) изменяли специальными вкладышами, а диаметр выходного отверстия камеры $\bar{d}_{вых} = d_{вых} / D_к$ варьировали сменными диафрагмами.

Исследование теплоотдачи проводили методом парового калориметрирования – конденсации слегка перегретого водяного пара, подаваемого в калориметр. Внутренний диаметр калориметра равен диаметру рабочего объема циклонной камеры. Секционированная конструкция циклонной камеры позволяла менять расположение калориметра по ее длине. Продольную координату $\bar{z}$ местоположения калориметра отсчитывали вдоль оси рабочего объема камеры от глухого торца.

Греющий пар из электрокотла через пароперегреватель поступал в рабочий участок калориметра. Температуру поверхности калориметра принимали равной температуре насыщенного пара. Общее количество теплоты, проходящее через боковую поверхность рабочей секции калориметра, определяли по массе собранного конденсата.

Опыты состояли из серий, которые характеризуются величиной относительной площади входа потока в камеру, а также различными значениями $\bar{d}_{\text{вых}}$ и $\bar{z}$. Во всех вариантах серий опыты выполняли при 5—6 значениях входного числа Рейнольдса $\text{Re}_{\text{вх}} = \upsilon_{\text{вх}} D_{\text{к}}/\nu_{\text{вх}}$, где $\upsilon_{\text{вх}}$ — скорость потока на входе в камеру (в шлицах); $\nu_{\text{вх}}$ — кинематический коэффициент вязкости потока в шлицах. Всего выполнено около 250 опытов.

Обобщение полученных опытных данных проводили в виде уравнения подобия $\text{Nu} = A\,\text{Re}_{\text{вх}}^{n}\,\varepsilon_{\text{г}}\varepsilon_z$, где $\text{Nu} = \alpha D_{\text{к}}/\lambda_{\text{вх}}$ — местное число Нуссельта; α — местный коэффициент теплоотдачи; $\lambda_{\text{вх}}$ — коэффициент теплопроводности воздуха; $\varepsilon_{\text{г}}$ — сомножитель, учитывающий влияние геометрических характеристик камеры; ε_z — сомножитель, учитывающий изменение числа Nu вдоль длины рабочего объема камеры; A — коэффициент пропорциональности.

Установлено, что $\varepsilon_{\text{г}} = \bar{f}_{\text{вх}}^{0,4}$, $\varepsilon_z = \bar{z}^{-0,163\bar{f}_{\text{вх}}^{-0,23}}$. В общем случае показатель степени n зависит от диапазона рассматриваемых чисел $\text{Re}_{\text{вх}}$. При $4\cdot10^4 \le \text{Re}_{\text{вх}} \le 1{,}58\cdot10^5$, $n = 0{,}73$. При $1{,}58\cdot10^5 \le \text{Re}_{\text{вх}} \le 5{,}98\cdot10^5$, $n = 0{,}75$. Таким образом, расчетное обобщающее уравнение подобия при $4\cdot10^4 \le \text{Re}_{\text{вх}} \le 1{,}58\cdot10^5$ имеет вид $\text{Nu} = 0{,}212\,\text{Re}_{\text{вх}}^{0,73}\,\varepsilon_{\text{г}}\varepsilon_z$, а при $1{,}58\cdot10^5 \le \text{Re}_{\text{вх}} \le 5{,}98\cdot10^5$ — $\text{Nu} = 0{,}171\,\text{Re}_{\text{вх}}^{0,75}\,\varepsilon_{\text{г}}\varepsilon_z$.

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы: в относительно длинных циклонных камерах пренебрежимо слабое влияние на теплоотдачу оказывают условия вывода газов (диаметр выходного отверстия); интенсивность теплоотдачи главным образом зависит от условий ввода потока в камеру (площади входа); локальные коэффициенты теплоотдачи на боковой поверхности циклонной камеры убывают по мере продвижения потока к выходному отверстию. Обобщающие уравнения могут быть рекомендованы для практического использования.

D.A. Onokhin, E.N. Saburov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb., 17

RESEARCH OF CONVECTIVE HEAT EXCHANGE IN RELATIVELY LONG CYCLONE CHAMBERS

УДК 533.6.011.5

*Н.В. Пальчековская**

Центральный аэрогидродинамический институт,
140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, 1

*e-mail: nathalie.palchekovskaya@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ СПУСКАЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В работе методами численного моделирования исследуется пространственное сверхзвуковое обтекание модели марсианского космического аппарата. Анализируется немонотонное поведение коэффициентов сопротивления и подъемной силы в зависимости от угла атаки и числа Маха. Моделирование основано на численном решении нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса с двухпараметрической дифференциальной моделью турбулентности q-ω. Решение задачи реализовано с помощью оригинального пакета программ HSFlow с применением эффективного параллельного алгоритма для многопроцессорных суперЭВМ.

Расчеты выполнены для сверхзвукового обтекания при числах Маха набегающего потока $M_\infty = 1{,}7;\ 2{,}027;\ 2{,}5$, числе Рейнольдса $Re_{\infty 1} = 4{,}1 \cdot 10^6$ 1/м и температуре $T_\infty = 217$ К. Поверхность полагалась изотермической с температурой поверхности $T_w = 300$ К. Координаты отнесены к характерному масштабу $R = 0{,}095$ м, что соответствует числу Рейнольдса $Re_\infty = 3{,}895 \cdot 10^5$. Для моделирования использована осевая система координат, связанная с поверхностью тела. Основные исследования выполнены на сетке 529×200×41 узлов. Для осуществления распределенных вычислений на многопроцессорных ЭВМ расчетная сетка разбивалась на 96 блоков.

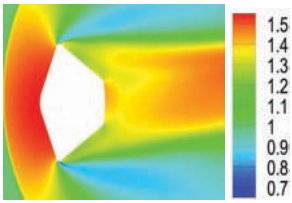


Рис. 1. Поле температуры

На рис. 1 показано поле температуры, позволяющее сделать качественный анализ картины обтекания. Согласно этим данным, в донной области имеется обширное отрывное течение с повышенным значением температуры.

Кривые на рис. 2 характеризуют поведение суммарной нормальной силы в зависимости от угла атаки для различных значений числа Маха.

Согласно этим зависимостям в диапазоне числа Маха от 1,5 до 2 имеется отрицательное значение нормальной силы при положительных значениях угла атаки.

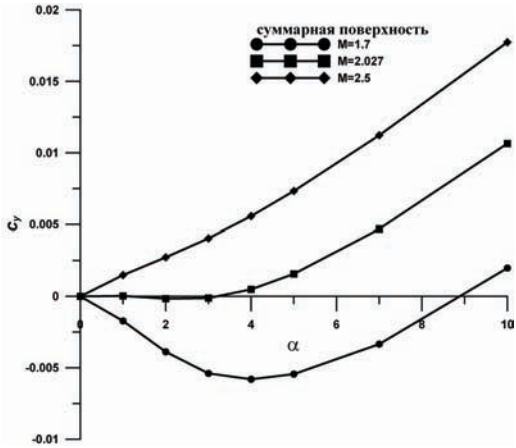


Рис. 2. Коэффициент подъемной силы в зависимости угла атаки для трех режимов течения

Вклад составляющей силы, действующей на наветренную поверхность, в суммарную нормальную силу является всегда положительным, а на подветренную поверхность — отрицательным. Таким образом, при малых сверхзвуковых скоростях набегающего потока, когда силы, действующие на наветренную и на подветренную поверхность, одного порядка, возможны режимы, при которых суммарная подъемная сила становится отрицательной в определенном диапазоне положительных углов атаки.

Литература

1. **Петров К.П.** Аэродинамика тел простейших форм. М.: Физматлит, 1998. 432 с.
2. **Башкин В.А., Егоров И.В.** Численное моделирование динамики вязкого совершенного газа. М.:Физматлит, 2012. 372 с.
3. **Башкин В.А., Егоров И.В., Пальчековская Н.В.** Взаимодействие ударных волн с пограничным слоем на острой и затупленной пластинах // ТВТ. 2016. Т. 54. № 3. С. 379—392.

N.V. Palchekovskaya

Central Aerohydrodynamic Institute,
Russia, 140180, Moscow region, Zhukovsky, Zhukovsky str., 1

PECULIARITIES OF SUPERSONIC FLOW OVER SPACE VEHICLE MODEL

УДК 621.1.65, 621.438

Ш.А. Пиралишвили, С.В. Веретенников

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ОГРАНИЧЕННЫХ И СТРУЙНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Развитие энергетических установок требует существенной интенсификации процессов тепло- и массообмена, протекающих в элементах их проточной части. В частности, снижение удельных затрат топлива и увеличение ресурса энергоустановок невозможно без создания эффективных систем конвективного охлаждения теплонапряженных деталей проточного тракта за счет повышения качества процесса теплосъема на внутренней поверхности охлаждающих каналов. С этой точки зрения высокой эффективностью обладает придание вращательного движения потоку охлаждающей среды.

Закрутка как струйного, так и ограниченного стенками канала потока приводит к крупномасштабному воздействию на все параметры поля течения, а следовательно, и на теплообмен [1]. Наличие поперечных преимущественному направлению движения компонент скорости — тангенциальной и радиальной — усиливает конвективный перенос массы, импульса и энергии, в следствии чего изменяется структура закрученных потоков, выравниваются локальные температурные неоднородности, подавляются или усиливаются случайные возмущения и др [1].

В зависимости от решаемой задачи можно выделить несколько способов интенсификации тепломассообмена локальной закруткой потока: циклонный; вихревой, с реализацией эффекта энергоразделения потока, и импактное натекание закрученных струй.

С целью анализа структуры течения в камере энергоразделения вихревой трубы и ее влияния на теплообмен выполнено численное моделирование процессов газодинамики и теплообмена в сопряженной постановке при установившемся и нестационарном режимах. Моделирование структуры потока формирующегося в каналах вихревой трубы, показало наличие сложной трехмерной системы вихрей формирующихся в условиях существенной нестационарности течения. Нестационарное взаимодействие масс газа, вращающихся на различном расстоянии от оси, в результате влияния развитой крупной и мелкомасштабной турбулентности приводит к образованию вторичных вихревых структур и формированию прецессирующего вихревого ядра потока. В процессе расчета наблюдались колебания расхода рабочего тела через вихревой энергоразделитель, частота колебаний составляет 600—700 Гц.

Выполнены экспериментальные исследования теплоотдачи в каналах вихревого энергоразделителя с использованием в качестве хладагента воздуха и водяного пара. Проведена оценка влияния затухания закрутки потока на интенсивность теплообмена. В результате обработки опытных данных найдены зависимости, позволяющие определять распределение коэффициентов теплоотдачи по длине камеры энергоразделения с учетом затухания закрутки потока, которые можно использовать для расчета режимных и геометрических параметров неадиабатных ВТ.

Основной недостаток импактного охлаждения связан с малой областью воздействия струи. Для решения этой проблемы предложено использовать комбинированную струю, состоящую из центральной осевой струи и периферийной закрученной. Выполнено численное моделирование и экспериментальное исследование газодинамики и теплообмена при натекании комбинированной струи. По сравнению с обычной осевой струей, частичная закрутка струи позволяет расширить область воздействия струи на поверхность и интенсифицировать теплоотдачу. Определены условия теплообмена при натекании комбинированной струи при варьировании импульсов осевой и периферийной струй, числа тангенциальных подводов в закручивающем устройстве периферийной струи, расстояния до охлаждаемой поверхности. Проведенные исследования в диапазоне перепада давлений от 1,05 до 1,3 на осевой струе и от 1,05 до 1,5 на закрученной, показали, что увеличение числа Рейнольдса от 10^4 до $3 \cdot 10^4$ приводит к возрастанию среднего коэффициента теплоотдачи от 290 до 650 Вт/(м^2·К).

Литература

1. **Пиралишвили Ш.А., Бирюк В.В., Веретенников С.В., Гурьянов А.И.** Вихревой эффект (Технические приложения). Том 2 (Часть 2). М.: ООО «Научтехлитиздат», 2014. 216 с.
2. **Пиралишвили Ш.А., Веретенников С.В.** Вихревой эффект и интенсификация процессов тепло- и массообмена в элементах энергетической техники // Вестник СГАУ им. С. П. Королева. 2011. № 3. Ч. 1. С. 241—247.

Sh.A. Piralishvili, S.V. Veretennikov

Rybinsk State Aviation Technical University ,
Russia, 152934, Rybinsk, Pushkina str., 53

THE FEATURES OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN CONFINED AND SWIRLING JET FLOWS

УДК 62-661

Ш.А. Пиралишвили, С.Г. Родионов

Рыбинский государственный авиационный технический университет
им. П.А. Соловьёва,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

РАЗРАБОТКА ВИХРЕВОЙ ПРОТИВОТОЧНОЙ ГОРЕЛКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА

Выполнен теплофизический анализ рабочего процесса противоточной вихревой горелки, предназначенной для сжигания твердого пылевидного топлива. Его применение позволяет отказаться от мазутных и дизельных воспламенителей, используемых для организации процесса горения в твердотопливных котлах, с повышением КПД, снижением эмиссии, увеличением срока службы топочных устройств.

Предварительные исследования и анализ состояния проблемы позволили определить геометрию его проточной части (рис. 1).

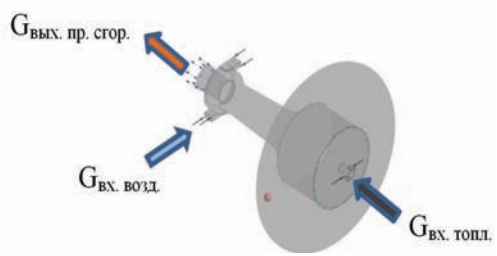


Рис. 1. Проточная часть горелочного устройства

Отражена актуальность поиска новых методов и устройств воспламенения и эффективного сжигания пылевидных топлив. С целью разработки отмеченного направления выполнены расчетно-аналитические исследования с применением современных вычислительных комплексов.

Изложен принцип организации сжигания твердого пылевидного топлива в противоточном закрученном потоке с проработкой его проточной части, ориентированной на реализацию устойчивого горелочного устройства. Преимущества разрабатываемого горелочного устройства заключаются в устойчивом протекании процесса горения, низких эмиссионных характеристиках, высокой полноте сгорания, организации зон со стехиометрическим соотношением компонентов, возможности эффективного самоохлаждения, ограниченного камерой сгорания.

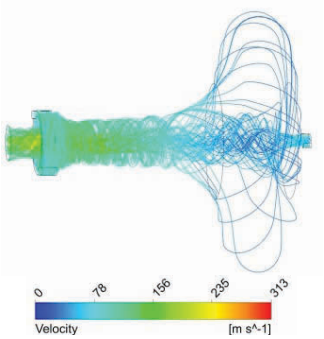


Рис. 2. Линии тока горелочного устройства

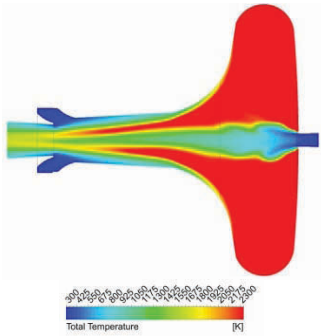


Рис. 3. Поле температуры в продольном сечении горелочного устройства

На рис. 2 и 3 показаны линии тока и характерное поле температуры соответственно, позволяющие сделать вывод о характере ее распределения. Горение преимущественно происходит в камере сгорания, после чего поток продуктов сгорания движется в сторону выхода, что позволяет организовать догорание в процессе смешения со встречным потоком воздуха и организовать необходимое выравнивание поля температуры на выходе из горелочного устройства.

Sh. A. Piralishvili, S. G. Rodionov

Rybinsk State Aviation Technical University ,
Russia, 152934, Rybinsk, Pushkina str., 53

DEVELOPMENT OF VORTEX COUNTERFLOW BURNER FOR SOLID PULVERIZED FUEL

УДК 532.5

Д.В. Платонов, А.В. Минаков, Д.А. Дектерев

Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛОСТОГО ПРОПУСКА ЧЕРЕЗ ГИДРОАГРЕГАТ ВЫСОКОНАПОРНОЙ ГЭС

В связи с широким применением гидроэлектростанций (ГЭС) в качестве инструментов регулирования нагрузки в энергосистемах гидроагрегаты подвержены частым сменам режимов работы. При этом в проточном тракте этих станций развиваются переходные процессы, характеризующиеся сильными нестационарными колебаниями расхода и давления, которые представляют очень серьезную опасность для станции. Кроме того, к переходным процессам относят такие нештатные режимы работы гидроагрегата, как холостой сброс воды через турбину, разгон и торможение агрегата, переход из турбинного в насосный режим для ГАЭС, которые также сопровождаются запредельными уровнями пульсаций потока и вибраций.

Основной целью данной работы является исследование именно холостого пропуска непосредственно через гидроагрегат. Холостой пропуск через агрегат гидротурбины используется при строительстве здания ГЭС или в случае сброса воды и является сложным технологическим процессом. В любом варианте холостого пропуска обтекание основных элементов конструкции проточного тракта будет происходить в нерасчетном режиме и, следовательно, сопровождаться значительным усилением нестационарных процессов и кавитации, что ведет к дополнительному износу и сокращению срока службы агрегата. Поэтому исследование и оптимизация процесса холостого пропуска являются актуальными задачами.

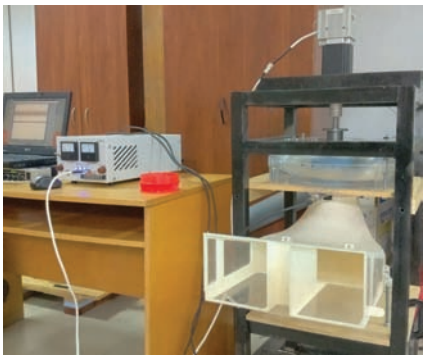


Рис. 1. Фотография экспериментального аэродинамического стенда

В рамках работы исследованы три основных варианта холостого пропуска через гидроагрегат: с заторможенным рабочим колесом, с демонтированным рабочим колесом и со свободно вращающимся рабочим колесом.

В ходе исследования предложены методы по описанию и изучению подобного рода процессов. В качестве основного инструмента планируется применять математическое моделирование. Для этого авторами предложен численный алгоритм для описания трехмерных нестационарных течений в проточном тракте высоконапорных ГЭС.

В рамках экспериментальной части работы проведена серия экспериментов по исследованию холостого пропуска на открытом аэродинамическом стенде (рис. 1) в масштабе 1/67,6, воспроизводящий полный проточный тракт гидроагрегата действующей высоконапорной ГЭС.



Рис. 2. Вихревая структура течения в диффузоре отсасывающей трубы (демонтированное колесо)

Основным предметом исследования являлись пульсации давления в проточном тракте, которые генерируются масштабными прецессирующими вихрями (рис. 2), образующиеся в нерасчетных режимах под крышкой турбины и в отсасывающей трубе гидроагрегата.

Литература

1. **The numerical** simulation of low frequency pressure pulsations in the high-head Francis turbine / A.V. Minakov, D.V. Platonov, A.A. Dekterev et al. // Computers & Fluids. 2015. doi:10.1016/j.compfluid.2015.01.007.
2. **Numerical** modeling of flow in the Francis-99 turbine with Reynolds stress model and detached eddy simulation method / D.V. Platonov, A.V. Minakov, A.V. Sentyabov et al.// Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 579. doi:10.1088/1742-6596/579/1/012004.

D.V. Platonov, A.V. Minakov, D.A. Dekterev

Siberian Federal University,
Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny ave., 79
Kutateladze Institute of Thermophysics,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akad. Lavrentyev ave., 1

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY IDLING PASSING THROUGH THE HIGH-HEAD HYDRAULIC UNITS HPP

УДК 536.24

А.А. Пожилов, А.И. Храбрый*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: aapozhilov@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРА КОНТУРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ «ТРЕХМЕРНОЙ/ОДНОМЕРНОЙ» МОДЕЛИ

В настоящее время для эффективного отвода тепла от тепловыделяющих элементов широко используются так называемые контурные тепловые трубы (КТТ) [1]. Основные элементы КТТ — конденсатор и испаритель. При подводе тепла к корпусу испарителя жидкость начинает испаряться, нагретый пар через паропровод поступает в конденсатор, где охлаждается и конденсируется, а затем по конденсатопроводу идет в компенсационную камеру, пристыкованную к испарителю. Роль капиллярного насоса, т.е. функцию прокачки теплоносителя из компенсационной камеры к зоне испарения, выполняет пористое тело. Обычно для расчета тепломассопереноса в КТТ используют комбинацию одномерной модели и метод сосредоточенных параметров, см. например [2].

В данной работе представляется гибридная «трехмерная/одномерная» (3D/1D) модель, разработанная для анализа работы конденсатора КТТ в стационарном режиме. Конденсатор состоит из трубки, по которой течет теплоноситель, и прикрепленной к ней пластины радиатора. Тепломассоперенос в трубке описывается в рамках одномерного приближения, а теплоперенос в стенках трубки и пластине радиатора — на основе трехмерного подхода. Модель встроена в конечно-объемный «неструктурированный» код SINF/Flag-S, развиваемый сотрудниками кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ. Для эффективного решения уравнения теплопроводности в коде реализован оригинальный многосеточный алгоритм [3]. В качестве примера приложения модели приводятся результаты численного анализа работы модели конденсатора КТТ (рис. 1), сходного с установленным на спутнике TacSat-4 [4].

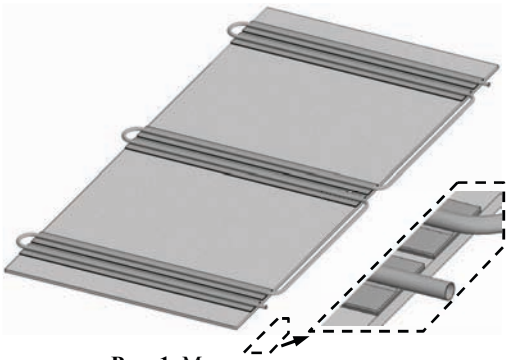


Рис. 1. Модель конденсатора

Литература

1. **Майданик Ю.Ф.** Контурные тепловые трубы — высокоэффективные теплопередающие устройства // Инновации. 2003. № 5. С. 83—86.
2. **Nishikawara M., Nagano H., Kaya T.** Transient Thermo-Fluid Modeling of Loop Heat Pipes and Experimental Validation // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2013. Vol. 27. No. 4. P. 641—647.
3. **Зайцев Д.К., Пожилов А.А., Смирнов Е.М., Смирновский А.А.** Численное моделирование сопряженного тепломассопереноса в испарителе контурной тепловой трубы // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2016): Труды Международной научной конференции. Архангельск, 28 марта – 1 апреля, 2016. С. 512—520.
4. **Dussinger P.M., Sarraf D.B., Anderson W.G.** Loop Heat Pipe for TacSat-4. // AIP Conference Proceedings. 2009. Vol. 1103, Is. 1. P. 91—100.

A.A. Pozhilov, A.I. Khrabry

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

NUMERICAL SIMULATION OF A LOOP HEAT PIPE CONDENSER WITH A HYBRID 3D/1D APPROACH

УДК 532.5; 621.039.578

И.Г. Поздеева, О.В. Митрофанова*

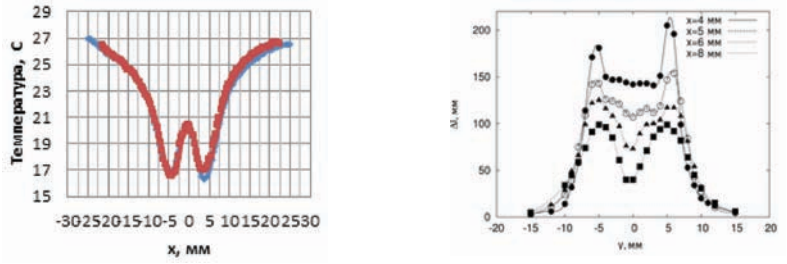
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское ш., 31

*e-mail: pozdeeva_irina@mail.ru

К ОЦЕНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ПРИ ПЕРЕХОДЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ К РЕЖИМУ РЕЗОНАНСНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

В настоящей работе рассматривается связь гидродинамических процессов с вибрациями элементов ЯЭУ, а также предлагается способ мониторинга крупномасштабных вихреобразований на основе использования акустического метода. Так как основные собственные частоты, характерные для ядерных реакторов, находятся в звуковом диапазоне, метод акустических резонансов позволяет своевременно диагностировать появление нежелательных вихревых структур и выявлять опасные гидродинамические режимы.

В результате проведенных исследований установлено явление «самонастройки» частот акустических колебаний, обусловленных вихреобразованием, на собственные частоты системы. Подобный процесс, как правило, возникает из-за неустойчивости начальной структуры течения и для открытых систем сопровождается притоком вещества из внешней среды. В экспериментах было установлено, что при достижении предельного расхода рабочего тела термодинамически более устойчивым становится структурированное состояние среды, когда механической энергии потока достаточно для образования упорядоченной вихревой структуры.



а) *б*)

Рис. 1. Поле температур на нижней поверхности плексигласовой преграды диаметром $D = 50$ мм (*а*) и профиль поля давления (*б*) при диаметре выходного отверстия вихревой камеры $d_0 = 5$ мм и расходе $G = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$ м^3/с

С помощью тепловизора получены распределения температур на нижней поверхности преграды и оценены потери энергии, связанные с охлаждением потока при его расширении (эффект Джоуля—Томсона). Проведенные теп-

ловые измерения (рис. 1, *а*) показали, что падение температуры между периферией и центром преграды составляло 5—20 °С в зависимости от размеров преграды. Резкое уменьшение давления в этой области благодаря вихреобразованию обеспечивало условие перехода через точку росы.

Регистрация в условиях критического расхода амплитудно-частотных характеристик потока позволяет четко выделить две характерных частоты гармонических колебаний, соответствующих угловой частоте вращения закрученного потока и частоте вращения в когерентных спирально-винтовых вихреобразованиях. При этом закрученная струя, выходя из отверстия вихревой камеры в области резкого поворота и радиального растекания потока из-за наличия преграды, разбивается на тонкие спиральные вихри, что подтверждается картиной визуализации вихревого следа. Поток может совершить несколько колебательных циклов, пока его энергия не станет достаточной для выхода во внешнюю среду. Формирующаяся таким образом вихревая система для своего устойчивого состояния требует повышенного расхода энергии. Источником дополнительной энергии выступают собственные колебания элементов конструкции вихревой камеры.

Обладающий большой кинетической энергией поток, вытекающий из вихревой камеры, возбуждает колебания упругой поверхности, сопровождающиеся колебаниями объема воздуха под преградой. Совпадение частоты одного из обертонов воздушных колебаний с собственной частотой верхней торцевой поверхности камеры приводит к возникновению резонанса, благодаря чему становится возможным образование устойчивой детерминированной вихревой структуры – поток распадается на систему когерентных радиальных спиральных вихрей с высокой частотой вращения

Таким образом, можно сделать вывод, что формирование вихревой структуры импактного закрученного потока способствует усилению упругих изгибных деформаций верхней плексигласовой поверхности вихревой камеры, определяющих частоту собственных акустических колебаний, что связано с переходом к резонансному режиму и может провоцировать начало вибрационного процесса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-08-00687-а.

I.G. Pozdeeva, O.V. Mitrofanova

National Nuclear Research University «MEPHI»,
Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31

TOWARDS THE ASSESSMENT OF ENERGY BALANCE IN HYDRO-MECHANICAL SYSTEM UNDER CONDITION OF TRANSITION TO THE MODE OF RESONANT INSTABILITY

УДК 532.526.4

С.С. Попович, Ю.А. Виноградов, М.М. Стронгин

Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,
119192, Москва, Мичуринский просп., 1

*e-mail: pss1@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ РЕБРА

Интенсивность теплообмена при сверхзвуковых скоростях оценивают по коэффициенту теплоотдачи α, который с учетом эффектов сжимаемости определяется отношением теплового потока в стенку q_w к разности между температурой стенки T_w и адиабатной температурой T_w^*:

$$q_w = \alpha \left(T_w^* - T_w \right). \qquad (1)$$

При определении коэффициента теплоотдачи по соотношению (1) основной проблемой является нахождение адиабатной температуры стенки [1]. В практике инженерных и научных расчетов эта температура определяется через коэффициент восстановления температуры r, термодинамическую температуру в потоке T_0 и число Маха M:

$$T_w^* = T_0 \left(1 + r \frac{\gamma - 1}{2} \mathrm{M}^2 \right). \qquad (2)$$

Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные для воздуха [2], показали, что для развитого турбулентного режима течения в сверхзвуковом потоке на пластине величина r лежит в пределах 0,885±0,01. В то же время при воздействии различных факторов (вдув/отсос из пограничного слоя, изменение формы и рельефа обтекаемой поверхности, отрывные течения, изменение свойств рабочего тела) коэффициент восстановления может уменьшаться практически до нуля. Эффект уменьшения коэффициента восстановления температуры (адиабатной температуры) в иностранной литературе получил название «аэродинамического охлаждения» [3] по аналогии с более известным в технике эффектом аэродинамического нагрева.

Экспериментальные исследования проводились на сверхзвуковом аэродинамическом стенде (рис. 1). Число Маха набегающего потока составляло 2,25, число Рейнольдса — не менее $2 \cdot 10^6$. Плоская модель, изготовленная из нетеплопроводного оргстекла [λ = 0,19 Вт/(м·К)], устанавливалась на нижней стенке параллельно основному потоку. Перед моделью устанавливалось ребро высотой от 2 до 8 мм и проводилось измерение параметров (статического давления, температуры стенки) в отрывной области за ребром [4].

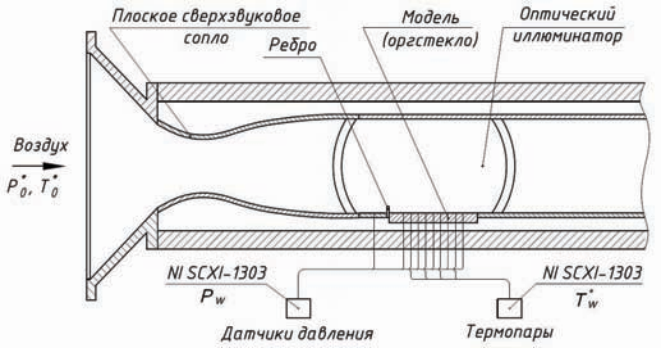


Рис. 1. Схема проведения экспериментального исследования влияния отрывного сверхзвукового течения за ребром на адиабатную температуру стенки

Коэффициент восстановления температуры, рассчитанный по найденной в эксперименте адиабатной температуре стенки, уменьшался в области отрывного течения за ребром до значений 0,817—0,854 с тенденцией к уменьшению при увеличении высоты ребра от 2 до 8 мм.

Работа выполняется за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00699).

Литература

1. **Hayes J.R., Neumann R.D.** Introduction to the aerodynamic heating analysis of supersonic missiles // Tactical Missile Aerodynamics: Progress in Astronautics and Aeronautics Series. Vol. 142. Washington: AIAA, 1992.
2. **Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И.** Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
3. **Ryan L.F.** Experiments on aerodynamic cooling // Ph. D. thesis, Eidgen. Tech. Hockschule. Zurich, 1951.
4. **Виноградов Ю.А., Попович С.С., Стронгин М.М.** Экспериментальное исследование коэффициента восстановления температуры и интенсификации теплоотдачи при течении на плоской стенке за ребром сверхзвукового потока сжимаемого газа // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 11. С. 55—75.

S.S. Popovich, Yu.A. Vinogradov, M.M. Strongin

Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Russia, 119192, Moscow, Michurinskiy ave., 1

AERODYNAMIC COOLING EFFECT RESEARCH FOR SUPERSONIC FLOW BEHIND A RIB

УДК 628.89

Н.О. Протасов[1,2]*, *В.С. Глазов*[2]

[1]ООО «Инженерно-технический центр»,
119526, Москва, просп. Вернадского, 101, корп. 3
[2]Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14
*e-mail: protasov@etc-energo.com

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ

В современных нормативных документах (ГОСТы, СНиПы и т.д.) расчет сопротивления теплопередачи наружных ограждений зданий основан на одномерном процессе переноса теплоты через плоскую стенку. Однако существует огромное количество зданий, наружная поверхность которых имеет архитектурные выступы (лепнина, карнизы), отдельные фрагменты которых показаны на рис. 1. Подобного типа выступы (ребра) различной формы могут приводить к увеличению теплоотдачи, что используется в теплообменных аппаратах [1]. Поэтому оценка величины влияния параметров и формы подобных выступов (ребер) на тепловые потери через элементы наружного ограждения здания представляет научный и практический интерес.



Рис. 1. Элементы наружного ограждения здания

Наши исследования показали, что высота выступов, имеющих различную форму (прямоугольную, треугольную, трапецеидальную) при одной и той же их массе по-разному влияет на теплоотдачу (рис. 2). Установлено, что ребра из материала с высоким коэффициентом теплопроводности и не теплоизолированным торцом имеют два экстремума (локальные минимум и максимум). Рост коэффициента теплопроводности не приводит к смещению локального минимума, но сдвигает локальный максимум в сторону больших высот ребра и значений теплового потока. Уменьшение величины коэффициента теплопроводности приводит к исчезновению локальных экстремумов. Что касается эффективности ребер, то она существенно зависит от коэффициента теплопроводности материала, из которого сделано ребро. Так, снижение эффективности теплоотдачи ребра из строительного камня за счет увеличения его высоты ($H > 0{,}2$ м) нецелесообразно по причине слабой зависимости теплоотдачи в области

высоких ребер. Если же элемент наружного ограждения облицован прочным и высокотеплопроводным рельефным материалом, то его параметры не должны соответствовать случаю максимальной теплоотдачи.

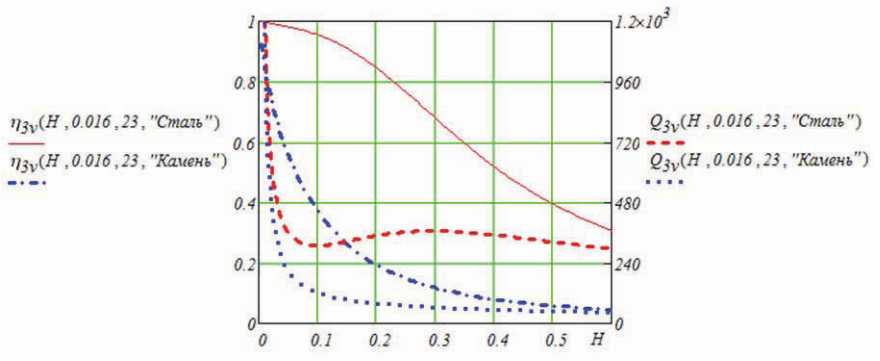


Рис. 2. Зависимость эффективности (η) и теплоотдачи (Q) прямоугольного ребра от его высоты (H) и вида материала при неизменных его значениях материалоемкости [Мё = $= H\delta = m/(\rho L) = 0{,}016$] и коэффициента теплоотдачи [$\alpha = 23$ Вт/(м^2·К)]

Таким образом, рельеф внешней поверхности наружного ограждения может по-разному влиять на величину тепловых потерь здания. Наличие ребер может привести как к ухудшению, так и к повышению теплозащитных свойств элементов наружного ограждения здания. Поэтому при проектировании здания необходимо учитывать рельеф его наружного ограждения.

Литература

1. **Оптимизация** и эффективность интенсификаторов теплообмена / Г.Н. Афонина, Э.А. Габдрахманов, В.С. Глазов, М.М. Идрисов // Энергосбережение – теория и практика: Труды VIII Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. С. 9—14.

N. Protasov [1,2], *V. Glazov* [2]

[1]LLC «Engineering and Technology Center» ,
Russia, 119526, Moscow, Vernadsky ave., 101, korp. 3
[2] National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14

EFFECT OF RELIEF OUTDOOR BARRIERS BUILDINGS AT ITS HEAT-SHIELDING CHARACTERISTICS

УДК 519.63; 536.244

Д.А. Прохоров, Ш.А. Пиралишвили

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВИХРЕВОГО ГАЗИФИКАТОРА С ЦЕЛЬЮ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЕГО РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

Введение. Ужесточение требований закона об охране окружающей среды обуславливает проблему утилизации вторичных энергоресурсов. Альтернативой долгосрочному хранению отходов служит переработка на установках различного типа, газифицирующих углеводородсодержащие отходы.

Существующие технологии газификации твердого топлива имеют ряд недостатков [2, 3], таких как неполнота переработки сырья, излишний расход окислителей и др.

Введение торообразной камеры сгорания с закруткой потока и генерацией вихревых структур позволяет добиться большей однородности полей концентрации окислителя, что приводит к снижению его расхода и обеспечивает более полную газификацию подаваемого топлива. Попытки создать вихревой газификатор изложены в работах [1, 3, 4]. Рабочий процесс известных «циклонных газификаторов» реализовывался при температуре t = = 450÷550 °С с образованием твердого полукокса, удаление которого из рабочего объема затруднительно. Такие установки недостаточно эффективны. Предлагается повысить температуру в камере газификации до 1000—1200 °С с целью организации жидкого шлакоудаления и тем самым упростить обслуживание установки. В докладе авторами предложено внести изменения геометрии камеры, позволяющее исследовать влияние различных ее геометрических параметров на рабочий процесс газификации.

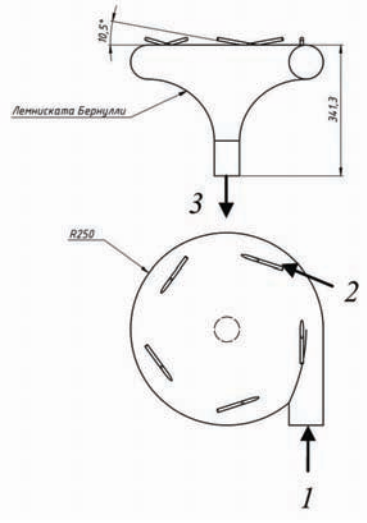


Рис. 1. Модифицированная геометрия проточной части камеры газификации

Численное исследование газодинамических течений в камере газификации. Анализ известных устройств позволил внести существенные изменения в конструкцию с добавлением улучшающих качества конструктивных элементов.

Добавлены патрубки подачи окислителя. В тангенциальный канал *1* подается пылеобразное топливо, частицы углерода которого взвешенны в перегретом водяном паре при температуре 1200 °С. В наклонные патрубки *2* поступает кислород при 350 °С. Результирующая смесь покидала установку через проточный канал *3*. В результате численного моделирования «холодной камеры» (без учета влияния химических реакций) получены поля концентраций окислителя и топлива. Особое внимание уделялось однородности полей концентрации и распределению температуры в камере.

Заключение. Анализ результатов численных расчетов позволил выявить влияние количества патрубков и угла наклона по отношению к камере на однородность полей концентраций окислителя и на распределение температуры внутри реакционного объема.

Литература

1. **Канторович Б.В.** Основы теории горения и газификации твердого топлива: учебное пособие. М.: Издательство АН СССР, 1958. 600 с.
2. **Лавров Н.В., Шурыгин А.П.** Введение в теорию горения и газификации топлива: учебное пособие. М.: Издательство АН СССР, 1962. 217 с.
3. **Хзмалян Д.М., Каган Я.А.** Теория горения и топочные устройства: учебное пособие. М.: Энергия, 1976. 488 с.
4. **Патент** № 2389946 РФ МПК F 23 C 5/32. Способ сжигания топлива в циклонном предпотоке котла и предпоток для его осуществления / И.Н. Новиков, Н.Н. Новиков; заявл. 10.11.2009; опубликован 20.05.2010.

D.A. Prokhorov, Sh.A. Piralishvili

Rybinsk State Aviation Technical University ,
Russia, 152934, Rybinsk, Pushkina str., 53

RATIONALISING EDDY GASIFIER OPERATION THROUGH OPTIMISATION OF ITS CHANNEL GEOMETRY

УДК 621.175

А.В. Птахин, В.С. Крылов, М.И. Седов, А.В. Кондратьев

ЗАО «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон»,
248010, г. Калуга, ул. Комсомольская Роща, 43

ОСОБЕННОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ СУХИХ ГРАДИРЕН И ВОЗДУШНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

При введении в эксплуатацию новых электростанций в настоящее время остро стоит вопрос охлаждающей воды: в мегаполисах ее стоимость очень высока, а в засушливых областях ее использование в принципе невозможно [1]. Кроме того постоянно ужесточаются и экологические требования к электростанциям по тепловым выбросам в водоемы. По этой причине даже системы оборотного водоснабжения с башенными градирнями открытого типа оказываются проблемными, поскольку их использование сопряжено с потерями циркводы, составляющими 2—5 % ее расхода.

Для решения проблемы с охлаждающей водой на реконструируемых и строящихся электростанциях водоохлаждаемые конденсаторы заменяют на сухие вентиляторные градирни (далее СВВГ) и воздушные конденсаторы (далее ВК).

Сухие СВВГ и ВК являются новым оборудованием на отечественных электростанциях. При введении данного оборудования возникает много вопросов по его эксплуатации и обслуживанию, вызванных недостатком подобного опыта у персонала электростанций. Кроме того, паспортные характеристики, заявленные производителем, не всегда подтверждаются, поэтому требуется проведение испытаний эксплуатируемого оборудования на соответствие заявленным характеристикам. Основные причины недостаточной работы СВВГ и ВК:

- загрязнение поверхностей теплообмена (далее ТО); для равномерного теплосъема и правильной работы ТО должны быть чистыми;
- нерасчетные расходы воздуха через ТО поверхности, снижение расходов воздуха приводит к уменьшению коэффициентов теплопередачи и, как следствие, потере эффективности СВВГ и ВК;
- несоответствие реальных показателей СВВГ и ВК проектным.

Описание испытаний. Исследования СВВГ и ВК проводятся в два этапа. Первый этап заключается в проверке функционирования систем СВВГ и ВК на соответствие техническим требованиям. Второй этап заключается в определении теплотехнических, аэродинамических и акустических параметров градирни. После выдаются рекомендации для работы с оборудованием.

Для проведения качественных испытаний необходимо максимально точно измерять параметры рабочих сред. Часть измерений выполняется с использованием штатных щитовых приборов АСУ СГ и турбоагрегата. Перед

испытаниями рекомендуется синхронизировать часы всех внешних систем измерения с часами АСУ станции.

Измерение критически важных параметров станционных систем АСУ должно быть продублировано с помощью внешней СИ с индивидуальной калибровкой в измеряемом диапазоне.

Результаты промышленных испытаний и сравнение их с заявленными производителем СГ приведены ниже:

Параметр	Единицы измерения	Расчетные показатели производителя СГ по ТЗ	Приведенные показатели
Температура воды на выходе из градирни	°С	25	28,2
Коэффициент теплопередачи для секции	Вт/(м^2·К)	40,7	28,4

Выводы:

1) при проведении промышленных испытаний СВВГ и ВК используется широкая измерительная база, включающая в себя дорогостоящее оборудование, такое как ультразвуковые расходомеры, откалиброванные термоэлектрические преобразователи, измерительные комплексы для определения расхода воздушного потока на выходе из вентилятора, мультианализатор для измерения воздушного шума, тепловизор и т.д.;
2) при проведении промышленных испытаний бывает трудно добиться режима СВВГ и ВК, предусмотренного программой испытаний, так как электростанция является режимным объектом и маневрирование основным оборудованием может привести к потери мощности на энергетическом блоке.

Литература

1 **Мильман О.О., Фёдоров В.А.** Воздушно-конденсационные установки. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 208 с.

A.V. Ptahin, V.S. Krylov, M.I. Sedov, A.V. Kondratev

Joint Stock Scientific Production Company «Turbocon»,
Russia, 248010, Kaluga, Komsomolskaya Roscha str., 43

FEATURES OF DRY COOLING TOWERS' AND AIR-COOLED CONDENSERS' FULL-SCALE THERMAL TESTING

УДК 536.24

А.С. Ракитин

Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского,
119991, Москва, Ленинский просп., 19

ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКЦИИ В КРИОСТАТЕ ВТСП ТРАНСФОРМАТОРА

Высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) устройства для энергетики требуют надежного криостатирования тепловыделяющих ВТСП элементов на уровне температур жидкого азота. Безаварийная работа ВТСП трансформатора предполагает конвективный режим охлаждения его обмоток. Заполненная криожидкостью полость криостата представляет собой группу вертикальных цилиндрических каналов, образованных ВТСП обмотками или стенками криостата и обмотками [1]. Теплота отводится прокачкой криожидкости через азотную полость. Формирование полей температуры и скорости, коэффициенты теплоотдачи, структура течения исследовались путем численного моделирования конвекции криожидкости, которое проводилось при помощи стандартных средств пакета OpenFOAM. Рассматривались влияние геометрии полости и расхода криожидкости. Задача решалась как для жидкой среды с граничными условиями второго рода, так и в сопряженной постановке. Стационарность процесса выступала в качестве одного из основных допущений. Полученные результаты сравнивались как с имеющимися в литературе аналитическими зависимостями [2], так и с рассчетно-экспериментальными исследованиями [3] конвекции в полостях.

Литература

1. **Первый** в России ВТСП трансформатор 1 МВ·А, 10/0,4 кВ / Э.П. Волков, Э.А. Джафаров, Л.С. Флейшман и др. // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 3. С. 45—56.
2. **Поляков А.Ф.** Вязкостно-термогравитационная конвекция и теплообмен в вертикальной полости при различных тепловых условиях // ТВТ. 2015. Т. 53. № 5. С. 758—764.
3. **Sparrow E.M., Azevedo L.F.A.** Vertical-channel natural convection spanning between the fully-developed limit and the single-plate boundary-layer limit. // IJoHMT. 1985. Vol. 28. Is. 10. P. 1847—1857.

A.S. Rakitin

Krzhizhanovsky Power Engineering Institute,
Russia, 119991, Moscow, Leninsky ave., 19

CONVECTION FEATURES IN THE CRYOSTAT OF HTS TRANSFORMER

УДК 621.9

И.А. Романов, А.Н. Казаков, А.И. Пыхтина*

Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, ул. Красноказарменная, 17А

*e-mail: romanoff_i_a@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ МЕТАЛЛОГИДРИДНОЙ ЗАСЫПКИ НА ЕЕ ВОДОРОДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА, МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ

Введение. В связи с введением в эксплуатацию значительного количества энергоустановок, использующих водород в качестве топлива, акцент исследований в сфере обратимого твердофазного хранения водорода сместился от лабораторных исследований перспективных интерметаллических соединений (ИМС) для хранения водорода в сторону разработки и тестирования реальных устройств с количествами ИМС, во много раз превосходящими лабораторные образцы. В ходе подобных исследований был обнаружен ряд особенностей сорбционного поведения мелкодисперсных металлогидридных засыпок в зависимости от количества ИМС и геометрии устройства хранения водорода.

Результаты и обсуждение. В данной работе был исследован образец ИМС AB5-типа на основе LaNi5 состава: La0.9Ce0.1Ni5 массой 500,517 г при горизонтальной и вертикальной ориентации рабочего автоклава с помощью измерения PCT-изотерм сорбции и десорбции водорода по методу Сивертса. При горизонтальной ориентации автоклава засыпка ИМС имеет форму полуцилиндра с радиусом 22,5 мм и высотой 180 мм. При вертикальной ориентации автоклава образец представляет собой кольцевую засыпку с внутренним радиусом 3 мм, внешним радиусом 22,5 мм и высотой 90 мм.

Полученные в результате экспериментов PCT-изотермы показывают, что смена ориентации образца с горизонтальной на вертикальную приводит к незначительному уменьшению содержания водорода в гидриде, равновесного давления десорбции, а также величины энтропии и энтальпии сорбции и десорбции водорода. Давление сорбции водорода снижается в значительно большей степени.

Известно, что изменение размера плотно упакованых частиц в ходе процессов десорбции и особенно абсорбции водорода вызывает внутренние напряжения в металлогидридных засыпках [1]. Данные напряжения искажают кристаллическую решетку ИМС и его гидрида, что приводит к снижению энергии активации гидрирования и дегидрирования и соответственно равновесного давления водорода.

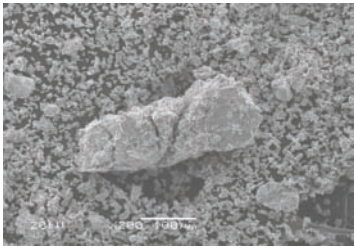


Рис. 1. Макрочастица ИМС из образца с высоты 10 мм от дна рабочего автоклава

Для изучения процессов диспергирования, седиментации и самопрессования в вертикальной засыпке были отобраны образцы порошка на различной высоте от дна рабочего автоклава и сделаны их микрофотографии. В образце со дна автоклава были обнаружены макрочастицы (рис. 1). Видно, что частица практически равномерно растрескалась до характерного размера, соответствующего окружающим частицам (менее 20 мкм), однако не распалась. Видимо, уплотнение засыпки до состояния агломерации уже произошло к моменту образования этой макрочастицы, и плотно упакованные окружающие микрочастицы не позволили ей рассыпаться.

Выводы. Обнаружено, что внутренние напряжения, которые возникают в мелкодисперсной засыпке ИМС большого масштаба, влияют на ее водородсорбционные свойства. Они приводят к снижению равновесного давления водорода, а также энтальпии и энтропии абсорбции и десорбции водорода и уменьшению гистерезиса давления за счет значительно более сильного снижения равновесного давления абсорбции по сравнению с десорбцией. Кроме того, искажение кристаллической решетки из-за внутренних напряжений приводит к тому, что часть межатомных пустот блокируются для атомов водорода, что приводит к падению сорбционной емкости ИМС.

Литература

1. **Xiaochen Hu, Zhaogang Qi, Feng Qin, Jiangping Chen.** Mechanism Analysis on Stress Accumulation in Cylindrical Vertical-Placed Metal Hydride Reactor // Energy and Power Engineering. 2011. No 3. P. 490—498.

I.A. Romanov, A.N. Kazakov, A.I. Pykhtina

Joint Institute of High Temperature,
Russia, 111116, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 17A

INFLUENCE OF METAL HYDRIDE FILLING GEOMETRY ON ITS HYDROGEN SORPTION BEHAVIOR, SCALE EFFECT

УДК 536.24 621.03

И.А. Рудой

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА ВЫБОР ТОЛЩИНЫ МНОГОСЛОЙНОГО РАЗРУШАЮЩЕГОСЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

В конструкциях теплозащитных покрытий теплонагруженных агрегатов широко используются разлагающиеся полимерные композиционные материалы: армированные (типа асбо-, стекло- и углепластиков), напыляемые, резиноподобные и т.д. При выборе математической модели теплопереноса необходимо оценить, какие коэффициенты модели оказывают наибольшее влияние на тепловое состояние теплозащитного покрытия, а какими можно пренебречь [1]. Такая операция позволяет существенно упростить математическую модель. Также на основании такого анализа можно сформулировать требования к точности задания коэффициентов модели исходя из требований к точности результатов расчетов.

Оценка влияния коэффициентов математической модели на решение задачи проектирования проводилась на примере выбора толщины теплозащитного покрытия тормозного экрана спускаемого аппарата, движущегося в плотных слоях атмосферы.

Задача выбора толщины теплозащитного покрытия формулируется следующим образом [2]:

$$\min\{m\},\ m = \sum_{l=1}^{n} \rho_{0,l} \Delta X_l\ , \tag{1}$$

где m — удельная масса покрытия в рассматриваемой точке; l — номер слоя теплозащитного покрытия; $\rho_{0,l}$ — начальная плотность материала l-го слоя покрытия; ΔX_l — толщина l-го слоя теплозащитного материала.

Исследования влияния погрешностей задания коэффициентов математической модели теплопереноса на результат решения задачи проектирования (1) проводились путем последовательного равномерного смещения следующих характеристик теплозащитного материала:

$$\begin{gathered} u_i \in \overline{u} = \left\{\lambda, c, C_g, H, E, A, \varepsilon, R\right\}, \\ \tilde{u}_i = u_i(1 \pm j\Delta),\ j = \overline{0,5}, \end{gathered} \tag{2}$$

где u_i — точное значение характеристики; $\tilde{u}_i$ — значение характеристики, заданное с погрешностями. Анализируемые коэффициенты модели [3]: c — теплоемкость; λ — теплопроводность; C_g — теплоемкость пиролизного газа; H — тепловой эффект деструкции; E — энергия активации; A — предэкспоненциальный коэффициент; ε — коэффициент черноты внешнего слоя; R — коэффициент термического сопряжения между слоями. После этого результаты, полученные при возмущенных значениях $\tilde{u}_i$, сравнивались с номинальными.

Литература

1. **Мишин В.П., Алифанов О.М.** Повышение качества отработки теплонагруженных конструкций и обратные задачи теплообмена. Практические приложения // Машиноведение. 1986. № 6. С. 11—21.
2. **Мишин В.П., Алифанов О.М.** Обратные задачи теплообмена — области применения при проектировании и испытаниях технических объектов // ИФЖ. 1982. Т. 42. № 2. С. 181—192.
3. **Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б.** Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.

I.A. Rudoi

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoe sh., 4

ESTIMATION OF HEAT TRANSFER MATHEMATICAL MODEL COEFFICIENTS INFLUENCE ON CHOICE OF MULTILAYER DESTRUCTIVE THERMAL PROTECTION COATING THICKNESS

УДК 697.34

Д.В. Суранов, В.Н. Ковальногов*

Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

*e-mail: suranoff@yandex.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Наиболее уязвимым звеном в системе централизованного теплоснабжения являются тепловые сети, общая протяженность которых в России составляет более 200 тыс. км (в пересчете на двухтрубную прокладку). Неудовлетворительное состояние тепловых сетей приводит не только к высоким потерям при транспортировке теплоносителя, но и к их частым повреждениям. Оценка физического состояния тепловых сетей, выполненная различными экспертами, показала, что 40—50 % теплопроводов уже выработали свой амортизационный ресурс. Поэтому большая часть аварий в системах теплоснабжения связана именно с их повреждением.

Следовательно, разработка методов реконструкции тепловых сетей для повышения их энергоэффективности является перспективным направлением.

Технический потенциал повышения эффективности использования и транспортировки тепловой энергии в России оценен в 840 млн Гкал, или 58 % потребления энергии, производимой в централизованных системах теплоснабжения.

Перспективными схемами представляется частичная децентрализация систем, находящихся в зоне предельной эффективности централизованного теплоснабжения.

Для решения задач оптимизации тепловых сетей необходимо достоверно прогнозировать тепловые потери с учетом их конструктивных и технологических параметров, фактического состояния теплоизоляции, территориальной распределенности и режима эксплуатации источников и объектов теплопотребления, актуальных местных метеоусловий. С этой целью в Ульяновском государственном техническом университете разработан и постоянно развивается соответствующий проблемно-ориентированный программно-информационный комплекс [2].

Разработка отдельных модулей комплекса, связанных с автоматизированным расчетом нормативных тепловых потерь, информационным наполнением баз данных по параметрам теплотрасс и подготовкой отчетной документации, начата в 2000 г. в рамках хоздоговорной НИР с ОАО «Ульяновскэнерго». Это позволило оперативно прогнозировать различные виды тепловых потерь в тепловых сетях г. Ульяновска и локализовывать «узкие

места» теплотрасс, характеризующиеся повышенными потерями и требующие реконструкции, выявлять кластеры рациональной децентрализации теплоснабжения.

Программно-информационный комплекс представляет выбор варианта реконструкции при минимальном изменении ее конфигурации, а следовательно, и минимальных капитальных вложениях. В этом случае минимизировались сроки окупаемости проекта при достижении требуемого значения пропускной способности, итерационно минимизируя общие расчетные затраты при уменьшении количества исследуемых трубопроводов. Реализован алгоритм расчета затрат при переводе части потребителей, теплоснабжение которых связано с наибольшими потерями при транспортировке, на децентрализованную систему теплоснабжения.

Разработанный программно-информационный комплекс может применяться как для выработки отдельных рекомендаций по повышению энергетической эффективности существующих тепловых сетей, так и выбору наиболее оптимальной конструкции тепловых сетей на стадии проектирования.

Литература

1. **Ковальногов В.Н., Суранов Д.В.** Программно-информационный комплекс для моделирования, исследования и оптимизации потерь тепловой энергии при транспортировании в энергетических системах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 5—6. С. 134—137.

D.V. Suranov, V.N. Kovalnogov

Ulyanovsk State Technical University,
Russia, 432027, Ulyanovsk, Severniy Venetz str., 32

NUMERICAL SIMULATION AND OPTIMIZATION OF HEAT LOSSES DURING TRANSPORT IN ENERGY SYSTEMS

УДК 620.92

А.И. Счастливцев, О.В. Назарова

Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, ул. Красноказарменная, 17А

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ

Разработан и создан модернизированный образец водородно-воздушного газогенератора, позволяющий проводить экспериментальные исследования по генерации пара в водородно-воздушной среде. Исследования проводились в три этапа. На первом этапе было проведено предварительное изучение зоны горения водорода и кислорода, а также зоны смещения продуктов реакции с воздухом. В результате предварительных исследований составлена карта измерений, в соответствии с которой были установлены датчики температуры и давления. Датчики температуры были установлены на расстоянии от 4 до 25 см от зоны горения, что позволило определить изменение температуры в процессе остывания продуктов реакции, а также при их последующим смешением с охлаждающим воздухом. Температура подаваемых воздуха и компонентов составила 16—19 °С. Давление водорода и кислорода на входе в смесительный элемент составило 28,4 и 25,3 атм соответственно, что позволило обеспечить более интенсивное их перемешивание за счет разницы в массовых расходах 0,7 и 5,4 г/с соответственно. В результате исследований установлено, что резкое смешение воздуха с продуктами реакции горения, температура которых может достигать 3600 К, приводит к их сильному разбавлению и образованию больших количеств непрореагировавшего водорода (до 3,5 %). На втором этапе были проведены исследования при ступенчатом смешении воздуха с продуктами реакции горения водорода и кислорода. Такая схема подачи, согласно предварительным результатам математического моделирования процессов в водородно-воздушном газогенераторе, позволяет снизить количество непрореагировавшего водорода до 0,5—1,2 % [1]. Подача воздуха проводилась в два этапа. Сначала 35—40 % всего подаваемого расхода воздуха подавались вдоль стенки камеры смешения, постепенно прогреваясь до температуры 1250—1400 °С и охлаждая продукты реакции до 1700—1800 °С. Затем оставшаяся часть воздуха подавалась под углом 35° навстречу образовавшемуся парогазу, в результате чего происходило интенсивное перемешивание компонентов. Результаты анализа экспериментальных данных показали, что использование ступенчатой схемы подачи воздуха снизило количество непрореагировавшего водорода до 1,4 %. Дальнейшее снижение возможно за счет использования большего количества ступеней охлаждения. Вместе с тем следует иметь в виду, что снижение количества воздуха, подаваемого на первой ступени, приводит к его большему разогреву и образованию оксида

азота. На третьем этапе проводилось исследование влияния давления в камере сгорания на полноту сгорания водорода и образование оксидов азота на выходе из водородно-кислородного парогенератора. Были проведены три экспериментальных исследования при давлении в камере сгорания 6, 12 и 24 атм соответственно. В результате проведенных исследований установлено, что повышение давления в камере сгорания приводит к увеличению полноты сгорания водорода и практически не оказывает влияния на образование оксидов азота. Таким образом, при использовании водородно-кислородных парогенераторов с воздушным охлаждением камеры сгорания для получения рабочего тела для газовых турбин наиболее предпочтительным является вариант с использованием турбин высокого давления, что также обеспечит более высокий КПД получения электроэнергии [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-8406.2016.8.

Литература

1. **Effectiveness** of steam generation in oxyhydrogen steam generators of the megawatt power class / S.P. Malyshenko, V.I. Prigozhin, A.R. Savich et al. // High Temperature. 2012. 50. 765—773.
2. **Schastlivtsev A.I., Nazarova O.V.** Hydrogen-air energy storage gas-turbine system // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). 2016. 63. 107—113.

A.I. Schastlivtsev, O.V. Nazarova

Joint Institute of High Temperature,
Russia, 111116, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 17A

EXPERIMENTAL RESEARCH OF PROCESSES IN HYDROGEN-AIR GAS GENERATOR

УДК 621.9

А.С. Талагаева, Ю.С. Дорож*

ОАО «Калужский турбинный завод»,
248010, г. Калуга, ул. Московская, 241

*e-mail: semen2011nyura@mail.ru

ОТВОД ТЕПЛА ОТ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Одной из важнейших задач проектирования современных транспортных паротурбинных установок (ПТУ) является организация отвода тепла при работе главной турбины, турбогенераторов и турбонасосов. Отвод теплоты, конденсирующегося в конденсаторе транспортной ПТУ пара, осуществляется только проходящей через него холодной морской водой, циркуляция которой через конденсатор может осуществляться:

1) принудительно от насоса, при любой скорости корабля;
2) за счет динамического напора, создаваемого при движении корабля;
3) за счет естественной циркуляции на неподвижном корабле.

В работе проведен расчет секции главного конденсатора при различной температуре охлаждающей воды на входе.

Отвод тепла от секции главного конденсатора транспортной паротурбинной установки на режиме естественной циркуляции охлаждающей воды возможен на стоящем неподвижно или движущемся с малой скоростью корабле (рис. 1). Существенное влияние на процесс теплопередачи оказывает температура охлаждающей воды.

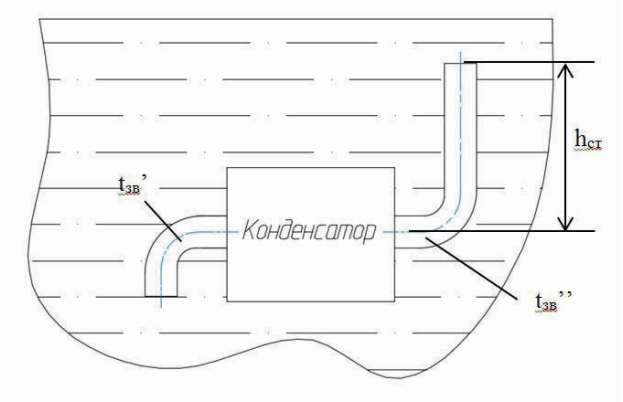


Рис. 1. Конфигурация канала подвода и отвода воды

При проектировании секции главного конденсатора транспортной паротурбинной установки необходимо добиваться максимального снижения об-

щего гидравлического сопротивления циркуляционной трассы корабля. Одновременно с этим расстояние между патрубками входа и выхода должно быть достаточно большим, чтобы избежать подмешивания горячей воды в приемный патрубок.

Секция главного конденсатора, оптимально спроектированная для естественной циркуляции, будет иметь заведомо большие габаритные размеры по сравнению с конденсатором, в котором циркуляция воды осуществляется принудительно, при одинаковом съеме тепловой нагрузки.

Литература

1. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи М.: Энергия, 1977.
2. **Мак-Адамс Вильям Х.** Теплопередача. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1961.

A.S. Talagaeva, Y.S. Dorozh

O.J.S.C. «Kaluga Turbine Works»,
Russia, 248010, Kaluga, Moscowskaya str., 241

DISCHARGING HEAT FROM HEAT-EXCHANGING EQUIPMENT OF MARINE STEAM-TURBINE PLANTS USING NATURAL CIRCULATION

УДК 536

Е.А. Тепляков, К.В. Царева

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА МЕЖДУ ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В данной статье мы исследовали передачу тепла между твердыми телами при низких температурах на основе работы Литтла. Для нахождения теплового потока между двумя твердыми телами, рассмотрели акустическую модель, в которой пренебрегли поперечной поляризацией.

Далее была рассмотрена модель Дебая для передачи тепла между телами при низких температурах, в которой групповая скорость линейно зависит от круговой частоты. И в итоге получили, что тепловой поток зависит от групповой скорости во второй среде.

Также была рассмотрена модель классического линейного осциллятора (Timothy S Fisher).

Используя функцию плотности состояний фононов, перешли к более общему случаю и получили аналитическое выражение для теплого потока.

Этот результат имеет важное практическое значение для электротехники.

Литература

1. **Little W.A.** The transport of heat between dissimilar solids at low temperatures // Can.J.Phis, 2013.
2. **Thermal** energy at the nanoscale (Lesson from Nanoscience., vol. 3) / Timothy S Fisher // World Scientific Publishing Co. Ptc. Ltd.: Purdue University, 2014.
3. **Ашкрофт Н.** Мермин Н. Физика твердого тела. Т.1. М.: Мир, 1979.
4. **Киттель Ч.** Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 791 с.
5. **Рейсленд Дж.А.** Физика фононов. М.: Мир, 1975. 368 с.

E.A. Teplyakov, K.V. Tsareva

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

THE TRANSPORT OF HEAT BETWEEN SOLIDS AT LOW TEMPERATURES

УДК 533.6.011.6

Р.В. Фёдоров, В.Н. Ковальногов, А.В. Чукалин, Л.В. Хахалева

Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТИ, ОБТЕКАЕМОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ПОТОКАМИ, ЗА СЧЕТ ДЕМПФИРУЮЩИХ ПОЛОСТЕЙ

Вопросы оптимизации тепловых режимов конструкции и тепловой защиты их элементов стали особенно серьезными и во многих случаях определяющими в связи с развитием реактивных двигателей и летательных аппаратов, движущихся с большими сверхзвуковыми скоростями.

Целенаправленный поиск условий, в которых содержатся резервы резкого повышения эффективности пленочного охлаждения, сдерживается отсутствием теории и математических моделей, обеспечивающих достоверное и точное прогнозирование эффективности пленочного охлаждения с учетом отмеченных особенностей. Комбинирование систем тепловых защит на поверхностях обтекаемых высокоскоростными тепловыми потоками позволит повысить коэффициент полезного действия установок, работающих при высоких тепловых нагрузках за счет увеличения температурного режима работы. Повышение эффективности температурной защиты в высокоскоростных потоках и снижение сопротивления турбулентного трения потока на поверхности возможно за счет применения демпфирующих полостей совместно с пленочным охлаждением поверхности. Демпфирующие полости работают следующим образом: поток, движущийся со скоростью по обтекаемой поверхности, взаимодействует через два перфорационных отверстия с глухой демпфирующей полостью для гашения пульсаций. При этом турбулентные пульсации давления (и скорости) вблизи поверхности приводят к перетеканию некоторой массы газа в полость и обратно. Из-за пружинящего эффекта полости турбулентные пульсации будут ослабевать, что приведет к уменьшению сопротивления трения потока (а также интенсивности тепло- и массоотдачи) на обтекаемой поверхности. При использования демпфирующих полостей возможно затягивание газовой завесы на поверхности, обтекаемой высокоскоростными потоками, благодаря ламинаризации пограничного слоя.

В результате решения системы дифференциальных уравнений совместно с начальными и граничными условиями находим профили скорости и температуры во всех точках расчетных сечений пограничного слоя. Эффективность определяется по результатам двух расчетов структуры пограничного слоя несущей среды. В первом расчете, который выполняется для условия

отсутствия завесы, определяются значения температуры восстановления в интересующих сечениях дисперсного потока. В этом расчете на всей поверхности стенки задается условие теплоизоляции. По результатам второго расчета, который выполняется при наличии завесы, в тех же сечениях определяются значения адиабатической температуры стенки, а также температура теплоизолированной стенки. Во втором расчете условие теплоизоляции задается только за пределами участка формирования завесы. На проницаемом участке формирования завесы (пористой вставке) на поверхности стенки задаются значения поперечной скорости охладителя (вдуваемого вещества) и температуры T_w.

Адекватность модели турбулентного дисперсного пограничного слоя проверялась путем сопоставления расчетов коэффициентов теплоотдачи дисперсного потока в соплах с опытными данными. Результаты сопоставления свидетельствуют о том, что предлагаемая методика в целом адекватно отражает особенности обменных процессов в дисперсном пограничном слое.

Проводя анализ полученных данных, мы видим, что наличие перфорированных отверстий на поверхностях, обтекаемых высокоскоростными дисперсными потоками, приводит к увеличению эффективности применяемой тепловой защиты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60114 мол_а_дк.

Литература

1. **Ковальногов Н.Н.** Пограничный слой в потоках с интенсивными воздействиями. Ульяновск: УлГТУ, 1996. 246 с.
2. **Волчков Э.П.** Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 239 с.

R.V. Fedorov, V.N. Kovalnogov, A.V. Chukalin, L.V. Hahaleva

Ulyanovsk State Technical University,
Russia, 432027, Ulyanovsk, Severniy Venetz str., 32

NUMERICAL STUDY THE EFFECTIVENESS OF THERMAL PROTECTION SURFACE IN A HIGH-SPEED FLOW DUE TO DAMPENS CAVITIES

УДК 621.039.6349

П.А. Фролко, В.В. Шумаев

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

ТЕПЛОВЫЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ ИСТОЧНИКОВ ПЛАЗМЫ ГЕЛИКОННОГО ТИПА

Среди множества индукционных источников плазмы низкого давления геликонный источник известен своей способностью генерировать наиболее плотную плазму. На его основе были разработаны инструменты для разнообразных приложений, такие как плазмохимические реакторы для обработки материалов, газовые лазеры, космические движители большой и малой мощности, утилизаторы вредных отходов и др.

Такой источник состоит из разрядной колбы (газоразрядной камеры), винтовой геликонной антенны, магнитной системы и устройства формирования пучка ионов (рис. 1).

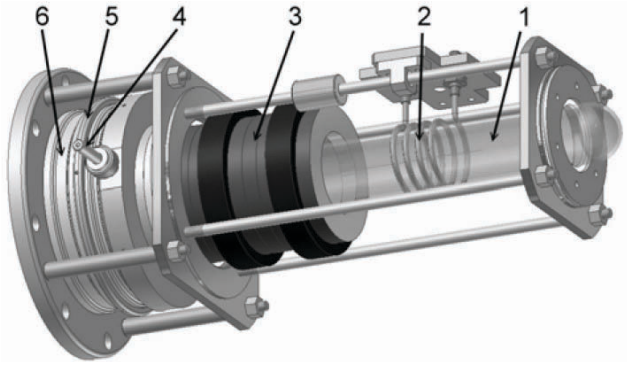


Рис. 1. Схема геликонного источника ионов: *1* — газоразрядная камера; *2* — винтовая антенна; *3* — магнитная система; *4* — отверстие для напуска газа; *5*, *6* — система электродов

Разрядная колба (газоразрядная камера) изготовлена из кварца и имеет внешний диаметр порядка 30 мм и длину 260 мм. Внутри колбы, как правило, находится аргон (плазма аргона) с рабочим давлением 5 мТорр. Геликонная антенна образована несколькими витками медной трубки диаметром 4 мм. Антенны, как правило, выполняются из медной трубки и в большинстве экспериментов охлаждаются потоком воды. Вводимое в течение 10 мкс с помощью антенны внутрь колбы высокочастотное поле имеет мощность порядка 1 кВт. Магнитная система (компактная магнитная система с постоянными магнитами круговой формы или система магнитных катушек) создает внутри газоразрядной камеры внешнее (по отношению к разрядной плазме), продольное магнитное поле специальной конфигурации. При этом

ток, протекающий по обмоткам катушек, составляет величину 10 А (напряженность магнитного поля имеет величину 60 Гс на оси системы).

При проектировании источников плазмы рассматриваемого типа следует выяснить, не приводят ли некоторые режимы работы к перегреву их корпуса и изменению его геометрии в результате действия температурных напряжений. С этой целью проведены оценки тепловых потоков, действующих на корпуса таких установок при заданных параметрах (мощности, вкладываемой в плазму, значению внешнего магнитного поля, виду и давлению рабочего газа [1—3]), а также выполнен численный расчет температурного поля и возникающих там температурных напряжений с использованием кодов собственной разработки и коммерческих пакетов [4, 5].

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 13.5240.2017/БЧ.

Литература

1. **Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.** // Applied Physics. 2015. No 2. P. 37—44.
2. **Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Polozova T.N.** // Probl. Atom. Sci. Tech. 2015. Vol. 4 (98). P. 49—52.
3. **Frolko P.A.** // American Institute of Physics, AIP Conf. Proc. 2016. 1771. 070013.
4. **Коваленко А.Д.** Термоупругость. Киев: Вища школа, 1975. 216 с.
5. **Pandey A.K., Dechaumphai P., Weiting A.R.** // NASA Technical Memorandum 102746. 1990. 10 p.

P.A. Frolko, V.V. Shumaev

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, 105005, Moscow, 2-d Baumanskaya str., 5

THERMAL ASPECTS OF HELICON PLASMA SOURCES OPERATION

УДК 533.6.011.6

А.А. Цынаева[1], *М.Н. Никитин*[1], *Е.А. Цынаева*[2]

[1] Самарский государственный технический университет,
443010, г. Самара, ул. Мододогвардейская, 224

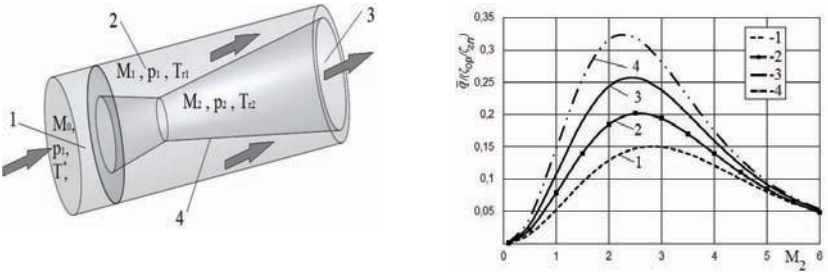
[2] Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

АНАЛИЗ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ

Энергоэффективность работы сверхзвуковых устройств температурной стратификации определяется видом рабочего тела, температурой восстановления, температурой торможения, площадью теплообмена. В настоящее время имеются некоторые экспериментальные данные по исследованию устройств сверхзвуковой температурной стратификации, показавшие, что в этих устройствах получают температурные перепады, не превышающие параметров работы вихревых труб [1]. Для интенсификации теплообмена со стороны дозвукового тракта устройства предлагается использовать различные виды оребрения [2, 3]. Однако при проектировании устройств газодинамической температурной стратификации следует учитывать не только интенсификацию теплопередачи, но и рост гидравлического сопротивления [2]. Расчет тепловой эффективности сверхзвуковой трубы температурной стратификации проведен в соответствии с методикой, используемой в работах Н.Н. Ковальногова и др. [3, 4]. При проведении анализа теплогидравлической эффективности применения ребер различной конфигурации для интенсификации температурной стратификации коэффициент эффективности ребер рассчитывался так же, как в работе [4]. Исследования выполнены при условии, что длина устройства сокращается при наличии оребрения. При проведения анализа коэффициент трения определялся в соответствии с формулой Кармана—Никурадзе, представленной в [5] и аппроксимируемой при значении $\mathrm{Re} = 3 \cdot 10^4 \div 10^6$ выражением

$$\zeta = 0,046\ \mathrm{Re}^{-0,25}. \qquad (1)$$

Полученные результаты анализа показали значительное влияние трения на эффективность процесса газодинамической температурной стратификации, расчет выполнен для дисперсного рабочего тела. Из представленных на рис. 1, *а* результатов видно, что из рассмотренных поверхностных интенсификаторов наиболее эффективными оказалось использование параболических шипов вогнутого профиля.



а) *б*)

Рис. 1. Схема процесса температурной стратификации: (*а*): *1* — камера исходного потока; *2* — тракт дозвукового течения; *3* — тракт сверхзвукового течения, *4* — сверхзвуковое сопло (сопло Лаваля) и некоторые результаты анализа теплогидравлической эффективности методов интенсификации температурной стратификации; (*б*): *1* — без интенсификаторов; *2* — с квадратными шипами; *3* — с параболическими продольными ребрами; *4* — с параболическими шипами

Литература

1. **Zditovets A. G., Vinogradov U. A., Titov A. A.** Experimental investigation of the heat transfer process at a gas-dynamic method of energy separation // Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, IHTC-15. August 10—15. 2014, Kyoto, Japan. IHTC15-8965.
2. **Разработка** фундаментальных основ создания прототипов энергоэффективных теплообменников с поверхностной интенсификацией теплообмена / А.И. Леонтьев и др. // Материалы конференции РНКТ-4. М., 2006. URL: http://www.rnhtc.ru/year/2006/lib/1-253.pdf (дата обращения 20.01.2015).
3. **Koval'nogov N.N.** Choice of Optimal Parameters of a Gasodynamic Temperature Stratification Process in the Supersonic Gas Flow // Russian Aeronautics (Iz.VUZ). 2010. Vol. 53. No 3. P. 283—288.
4. **Цынаева А.А., Никитин М.Н., Федотенков И.Д.** Влияние формы поверхности теплообмена на эффективность газодинамической температурной стратификации // Тезисы докладов и сообщений XV Минского международного форума по тепло- и массообмену. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова, 2016. С. 232—234.
5. **Kakac S., Hongtan Liu.** Heat exchangers: selection, rating and thermal design // CRC Press LLC, 2002. 260 p.

A.A. Tsynaeva[1], *M.N. Nikitin* [2], *E.A. Tsynaeva*[1,2]

[1] Samara State Technical University,
Russia, 443010, Samara, Mododogvardeyskaya str., 224
[2] Ulyanovsk State Technical University,
Russia, 432027, Ulyanovsk, Severniy Venetz str., 32

ANALYSIS OF THERMAL AND HYDRAULIC EFFICIENCY OF METHODS OF AN INTENSIFICATION OF THE THERMAL STRATIFICATION

УДК 536.242; 621.03

Ю.И. Шанин[1]*, *А.В. Черных*[1], *И.С. Шарапов*[1,2]

[1]Научно-исследовательский институт НПО «ЛУЧ»,
142100, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24

[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское шоссе, 31

*e-mail: syi@luch.podolsk.ru

ТЕПЛОВЫЕ ЗАДАЧИ В ЭЛЕМЕНТАХ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В работе проведен анализ некоторых теплообменных задач в элементах адаптивных оптических систем — АОС (лазерных зеркалах, пьезоэлектрических приводах). Аналитически обоснованы методы компенсации возникающих при этом изгибных перемещений оптической поверхности.

Элементы АОС входят в состав оптической схемы лазерной установки и работают в условиях воздействия мощных лазерных пучков и различных тепловых воздействий. Наиболее интересным объектом АОС с точки зрения теплообмена является деформируемое зеркало (корректор волнового фронта излучения). Кроме воздействия лазера зеркало подвергается тепловому разогреву при работе приводов, с помощью которых формируется нужная отражающая поверхность. При умеренных плотностях мощности светового потока удается обходиться неохлаждаемыми оптическими элементами (ОЭ). При возрастании мощности используется принудительное охлаждение.

В работе проанализированы результаты решения в упрощенной постановке некоторых теплообменных задач как для неохлаждаемых, так и для охлаждаемых ОЭ. Рассматривались только одномерные температурные поля в ОЭ в условиях воздействия: 1) на оптическую поверхность равномерного светового потока; 2) на конструкцию зеркал теплового удара разогретого теплоносителя или последствий его разогрева в процессе работы. Основной фактор, ограничивающий работу ОЭ, — изгибные термоперемещения оптической поверхности. В процессе работы лазерных установок необходимо обеспечить термическую стабильность оптической поверхности ОЭ. Для повышения термической стабильности ОЭ: 1) разрабатываются и применяются стабильные материалы, такие как кремний (Si), карбид кремния (SiC), молибден (Mo), супериньвар (32НК-ВИ), ситалл (СО115м); 2) используются высокоотражающие интерференционные покрытия; 3) используются высокоэффективные системы охлаждения; 4) используются преимущества проходной и зеркальной оптики.

Повышение порога применения неохлаждаемой оптики достигается за счет увеличения диаметра апертуры оптического элемента, роста коэффи-

циента зеркального отражения — КЗО (используя многослойные интерференционные покрытия). Это уменьшает плотность теплового потока в ОЭ.

В анализе использовано решение для одномерного нестационарного температурного поля в плоской пластине, нагруженной с одной стороны равномерным тепловым потоком и теплоизолированной с другой стороны [1]. Оценка и сравнение работоспособности ОЭ проводились по достигаемому уровню термоперемещений оптической поверхности. По этому признаку предъявляются требования к максимальному тепловому потоку или КЗО ОЭ.

В работе установлены условия перехода от неохлаждаемых к охлаждаемым ОЭ [1]. Особое внимание уделено возможностям термокомпенсации изгибных перемещений как в стационарных условиях лазерного нагружения, так и в различных нестационарных режимах работы ОЭ (тепловой удар, разогрев теплоносителя) [2, 3].

Решение тепловых задач в приводах деформируемых зеркал было нацелено на определение энерговыделения в них при различных условиях [4, 5]. При некоторых допущениях и упрощениях получены зависимости для температурных полей в приводе в виде сплошного и полого цилиндров при объемном выделении тепла.

Литература

1. **Шанин Ю.И., Шанин О.И., Черных А.В., Шарапов И.С.** Пределы работоспособности неохлаждаемых и охлаждаемых оптических элементов // Тезисы докл. и сообщ. XV Минского междунар. форума по тепло- и массообмену. Минск: ИТМО, 2016. Т. 2. С. 456—461.
2. **Шанин Ю.И., Шанин О.И.** Неустановившиеся процессы в охлаждаемых многослойных пластинах //В сб. Теплофизические проблемы ядерной техники. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 55—58.
3. **Шанин Ю.И., Шанин О.И.** Термокомпенсация изгибных перемещений лазерного зеркала// Тезисы докл. и сообщ. V Минского междунар. форума по тепло- и массообмену. Минск. ИТМО, 2004. Т. 2. С. 332—334.
4. **Шанин О.И.** Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. М.: Техносфера, 2013. 296 с.
5. **Шанин Ю.И., Шанин О.И., Черных А.В., Шарапов И.С.** Тепловое состояние пьезоприводов в лазерных деформируемых зеркалах // Тепловые процессы в технике. 2015. № 10. С. 471—480.

Yu.I. Shanin[1]*, A.V. Tchernych*[1]*, I.S. Sharapov*[1,2]

[1]FSUE «SRI SIA «LUCH», 142100, Russia, 142100, Podolsk, Zheleznodorozhnaya, 24

[2]National Nuclear Research University «MEPHI»,
Moscow, 115409, Kashirskoye sh., 31

THERMAL TASKS IN ELEMENTS OF THE ADAPTIVE OPTICAL SYSTEMS

УДК 621.039.524:536.24

Е.В. Шкрыгунова, И.Л. Парамонова*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: eliza.shkrygunova2010@ya.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЧАСТИЧНОМ ОСУШЕНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР

Существует много теплогидравлических процессов и явлений в элементах оборудования АЭС, для которых отсутствуют надежные расчетные методики. Одной из таких проблем является определение температуры поверхности твэлов, охлаждаемых дисперсным пароводяным потоком при частичном осушении активной зоны ВВЭР.

Частичное осушение активной зоны может возникнуть на заключительной стадии аварии с некомпенсируемой течью теплоносителя. Остаточные тепловыделения в активной зоне, низкие значения давления, отсутствие циркуляции по первому контуру могут привести в зоне осушения к резкому увеличению температуры оболочек твэлов вплоть до предельно допустимых значений. Самым опасным является их последующее разрушение и выход радиоактивности за пределы активной зоны реактора.

За основу взята модель передачи тепла от стенки к дисперсному потоку, предложенная Розенау (Rohsenow) и др. [2]. В модели наряду с конвективной теплоотдачей от стенки к пару рассмотрен теплообмен между стенкой и каплями за счет прямого контакта и радиацией, а также между перегретым паром и каплями.

Согласно модели общий тепловой поток от стенки распределяется между фазами следующим образом:

$$q_w A_{heat} = \alpha_{wg} (A_{heat} - A_{wd}) (T_w - T_g) + \alpha_{gd} A_d (T_g - T_s) + \\ + q_{rad,d} A_d + \alpha_{wd} A_{wd} (T_w - T_s), \quad (1)$$

где $\alpha_{wg} (A_{heat} - A_{wd}) (T_w - T_g)$ — конвективный тепловой поток от стенки к пару; $q_{rad,d}$ — радиационный поток тепла к каплям; $\alpha_{gd} A_d (T_g - T_s)$ — теплообмен между паром и каплями; $\alpha_{wd} A_{wd} (T_w - T_s)$ — тепло, переданное каплям на стенке (при прямом контакте или через прослойку пара при температуре стенки больше температуры Лейденфроста); A_d, A_{wd}, A_{heat} — площадь поверхности капель, площадь контакта капель со стенкой и обогреваемая площадь канала соответственно.

Ключевой проблемой при расчете теплообмена с каплями является определение размера капель, площади контакта капель со стенкой, коэффициента выпадения, скорости выпадения капель и др. На сегодняшний день не представляется возможным экспериментально определить эти величины.

Поэтому их определяют по косвенным измерениям в ограниченной области параметров (зачастую для газожидкостных потоков при атмосферном давлении). В методике предлагается рассчитывать неизвестную величину площади контакта капель со стенкой A_{wd} из уравнения (1), разделив обе части на A_{heat} и подставив отношение A_d/A_{heat}, вычисленное по формуле [3]

$$\frac{A_d}{A_{heat}} = 0,9\frac{d_г}{d_d}\cdot\left(1-\bar{\phi}\right), \qquad (2)$$

где d_d — диаметр капель в потоке, определяемый по формуле

$$d_d = \sqrt{\frac{w''18\mu_g}{g\left(\rho_f-\rho_g\right)}}, \qquad (3)$$

где w'' — скорость витания капли.

В методике принимается, что зона существования капель ограничена областью $T_w - T_g < 150$ K , капли имеют одинаковый размер d_d, скорость капель равна скорости пара. Испарение капель по длине канала не учитывается.

Проведены расчеты температуры стенки твэла по предлагаемой методике для условий эксперимента ЦКТИ, проведенного на 37-стержневой модели сборки ВВЭР-1000 [1]. На рис. 1 представлено сравнение рассчитанных по предлагаемой модели и экспериментальных значений температуры поверхности центрального твэла. Размер капель, определенный по методике, составил 106 мкм для условий эксперимента, что не противоречит данным других исследователей [6, 7].

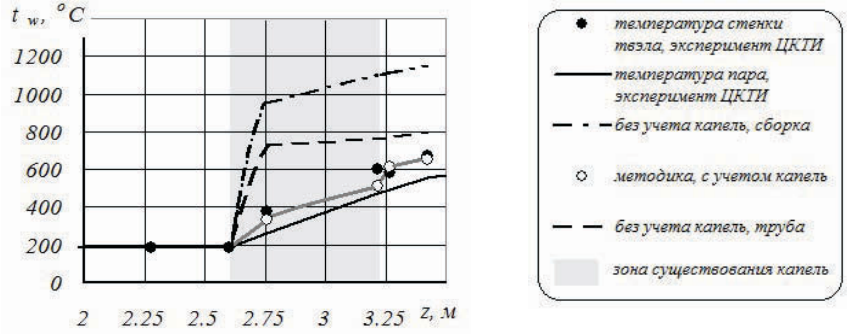


Рис. 1. Сравнение рассчитанных по методике и экспериментальных [1] значений температуры поверхности центрального твэла

Из рисунка видно, что расчет по методике лучше согласуется с данными эксперимента, чем расчеты по формулам для трубы эквивалентного гидравлического диаметра и стержневой сборки.

В модели учтен радиационный теплообмен с каплями, а также передача тепла конвекцией от перегретого пара к каплям и теплопроводностью при

контакте капель со стенкой. В расчетах получено, что в зоне существования капель ($T_w - T_g < 150$ К) передача тепла при контакте капель со стенкой вносит существенный вклад в теплообмен при охлаждении осушенной поверхности твэлов. Радиационный поток тепла также необходимо учитывать при расчете теплообмена в ламинарном дисперсном потоке.

Литература

1. **Гурьянов С.В.** Экспериментальное исследование и методика расчета тепловых потоков частично осушенных тепловыделяющих сборок реакторов с водяным теплоносителем в условиях аварии типа «малая течь»: Дисс. … канд. техн. наук. СПбГТУ, 1992. 183 с.
2. **Post Critical** Heat Transfer to Flowing Liquid in a Vertical Tube / D.N. Plummer, O.S. Iloeje, W.M. Rohsenow et al. Report №72718-91, MIT, Cambridge, Massachusetts, 1974.
3. **Агафонова Н.Д., Парамонова И.Л.** Оценка размера капель в дисперсном потоке // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 4. С. 837—845.
4. **Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С.** Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. В 2 т. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ. М.: ИздАт, 2010. 776 с.
5. **Юдов Ю.В., Волкова С.Н., Мигров Ю.А.** Замыкающие соотношения теплогидравлической модели расчетного кода КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. № 11. С. 22—29.
6. **Kocamustafaogullari G., Ishii M.** Foundation of the interfacial area transport equation and its closure relations // Int.J. Heat Mass Transf. 1995. Vol. 38. No. 3. P. 481—493.
7. **Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л.** Теплообмен в ядерных энергетических установках: учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2003. 548 с.

E.V. Shkrygunova, I.L. Paramonova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

METHOD OF HEAT EXCHANGE CALCULATION AT PARTIAL VVER CORE UNCOVERY

УДК 629.7.075.8

А.А. Шкуратенко

Московский Авиационный Институт
(национальный исследовательский университет),
125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

ВЛИЯНИЕ ГЕТЕРОГЕННОГО КАТАЛИЗА НА ТЕПЛООБМЕН В ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

При входе орбитального космического летательного аппарата (КЛА) в плотные слои атмосферы, скорость набегающего потока такова, что на поверхности конструкции начинают протекать химические реакции. Для воздуха такими реакциями являются реакции диссоциации молекул и рекомбинации атомов кислорода и азота. Такие условия создаются при полете КЛА со скоростью $M \geq 6$. При указанной скорости в точке торможения осесимметричного тела реализуется температура порядка 2500 К. При такой температуре и давлении торможения, равном примерно 10^5 Па, молекулы кислорода диссоциируют на два атома с поглощением теплоты:

$$O_2 \underset{k_2}{\overset{k_1}{\leftrightarrow}} O + O + Q_{\text{хим}}$$

Пограничный слой, в котором реализуется такая реакция, получил название химически активный. Скорость набегающего потока, при которой пограничный слой становится химически активный, называется гиперзвуковой скоростью, а летательный аппарат — гиперзвуковой летательный аппарат (ГЛА).

Механизм переноса тепло- и массообмена в химически активном пограничном слое для представлен на рис. 1.

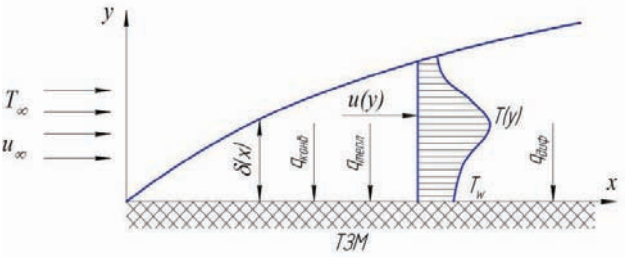


Рис. 1. Механизм переноса тепло- и массообмена в химически активном пограничном слое: $q_{\text{тепл}}$ – тепловой поток, обусловленный теплопроводностью; $q_{\text{кон}}$ – тепловой поток, обусловленный конвекцией; $q_{\text{диф}}$ — тепловой поток, обусловленный диффузией; $\delta(x)$ — толщина пограничного слоя; $u(y)$ — скорость потока в пограничном слое; $T(y)$ — распределение статической температуры по толщине пограничного слоя; T_w — температура поверхности; T_∞ и u_∞ — температура и скорость набегающего потока [1]

Таким образом, тепловой поток в конструкцию будет суммироваться за счёт трех составляющих.

$$q_{\sum} = q_{\lambda} + q_{\text{конв}} + q_{\text{диф}}\,. \qquad (1)$$

Тепловой поток, подведенный к стенке за счет диффузии атомов определяется интенсивностью реакции рекомбинации атомов, которая происходит на поверхности (гетерогенные реакции). Так как это реакция химическая, то ей можно управлять, используя материалы, обладающие свойствами катализаторов или ингибиторов. Схема протекания гетерогенной реакции при определенном значении каталитической активности поверхности представлена на рис. 2.

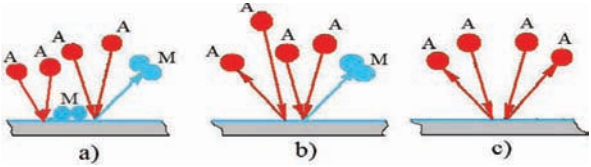


Рис. 2. Схема реализации гетерогенной реакции рекомбинации: А – атом, М – молекула: *a* — абсолютно каталитическая поверхность; *b* — каталитическая поверхность; *c* — некаталитическая поверхность [2]

Весь представленный механизм тепло- и массообмена реализуется в случае ламинарного пограничного слоя. Если пограничный слой турбулентный, то указанный механизм нарушается, что обусловлено переносом массы за счёт вихреобразования.

В реальных условиях полета ГЛА планирующего класса на поверхности теплонапряженных элементов конструкции планера создается специальная тепловая защита. Чтобы повысить эффективность такой тепловой защиты материалы ее поверхности должны обладать конкретными каталитическими свойствами. Благодаря этим свойствам на поверхности таких материалов реализуются процессы химической каталитической абсорбции, которая в несколько раз снижает интенсивность теплообмена в конструкцию аппарата, а значит, на 20—30 % уменьшить массу тепловой защиты аппарата [2].

Список литературы

1. П.В. Никитин «Тепловая защита «. – М.: Изд-во МАИ, 2006-512с.: ил.
2. П.В. Никитин, Е.В. Сотник. Катализ и излучение в системах тепловой защиты космических аппаратов. М.: Янус-К, 2013-336с.

A.A. Shkuratenko

Moscow Aviation Institute National Research University
125993, Moscow, Volokolamskoe shosse, 4

THE INFLUENCE OF HETEROGENEOUS CATALYSIS ON THE HEAT TRANSFER IN A CHEMICALLY ACTIVE BOUNDARY LAYER

КРУГЛЫЙ СТОЛ



«2017 – год экологии»

УДК 53.04

М.Ю. Егоров, В.В. Сергеев, Е.Д. Федорович*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: egorov12m2u@mail.ru

РОЛЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ВОЗНИКНОВЕНИИ И ПРОТЕКАНИИ АВАРИИ НА ЧАЭС

Организация надежного охлаждения активных зон (АЗ) ядерных реакторов на основе изучения и использования происходящих в этих реакторах теплогидравлических процессов имеет исключительное значение в решении проблемы безопасности ядерных энергетических установок [1].

При аварии в АЗ были введены поглощающие стержни системы управления и защиты (СУЗ) реактора с графитовыми вытеснителями воды.

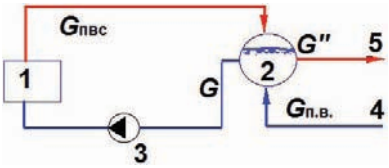


Рис. 1. КМПЦ: *1* — ядерный реактор; *2* — барабан-сепаратор; *3* — ГЦН; *4* — подвод питательной воды; *5* — отвод пара на две турбины

1. Особенности рабочего процесса в контуре многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) РБМК-1000 в предаварийный период. На рис. 1 показана схема КМПЦ. В штатном режиме на мощности 1000 МВт-эл на вход технологических каналов (ТК) снизу главными циркуляционными насосами (ГЦН) подается охлаждающая реактор вода (G = 37 500 т/ч). Проходя через ТК, вода превращается в пароводяную смесь. На выходе из ТК она имеет $p \sim 7{,}6$ МПа, $t \sim 290$ °С, паросодержание $x_{\text{вых}} = 14{,}5$ %.

Тепловой баланс КМПЦ: $Q = G\,(i'_s - i_{\text{вх}}) + G\,r\,x_{\text{вых}}$; Q — мощность реактора на подогрев воды от энтальпии $i_{\text{ВХ}}$ до энтальпии насыщения i'_s, на испарение части расхода, соответствующее росту балансового паросодержания от 0 до $x_{\text{вых}}$; r — теплота парообразования воды; i'_s и r находятся из таблиц водяного пара [2].

В предаварийной ситуации [3] режимы были нестационарными. С 25.04 происходило 1) отклонение в полдень 25.04 одной турбины со снижением мощности реактора в два раза; 2) отклонение в то же время двух ГЦН (из восьми); 3) включение этих двух насосов обратно; 4) ксеноновое отравление реактора, вызванное снижением мощности, которое привело к тому, что ко времени проведения эксперимента по выбегу турбогенератора тепловая мощность реактора самопроизвольно понизилась до 500 МВт [3], после чего оператор произвел дополнительное извлечение стержней из АЗ для борьбы с отравлением с целью стабилизации мощности. При этом было допущено

снижение мощности до ~30 МВт. Колебания мощности реактора и расхода воды через него привели к возмущениям в КМПЦ.

2. Возникновение опасной связи между нейтронно-физическими и теплогидравлическими факторами, которые привели к аварии. На момент аварии выгорание топлива в реакторе превысило 1100 МВт-сутки/ТВС. Отравление ксеноном было максимальным в центральной части, где нейтронные потоки выше. Отрицательную роль сыграла и малая мощность реактора (200 МВт на уровне стабилизации; на момент нажатия аварийной защиты она росла самопроизвольно из-за повышения паросодержания в ТК).

Выводы. I. Рассмотрено влияние на возникновение и ход аварии факторов и явлений теплогидродинамического характера:

• вскипание теплоносителя в нижней части АЗ в специфических условиях для ситуации перед аварией: 1) высокое выгорание топлива; 2) перекос энерговыделения по вертикальной координате с максимумом внизу зоны; 3) низкий уровень мощности; 4) ксеноновое отравление; 5) манипуляции персонала. Вскипание через паровой коэффициент реактивности способствовало неконтролируемому росту нейтронной мощности реактора при вводе дополнительной реактивности — вытеснения водяных «столбиков» из нижней части каналов СУЗ при срабатывании аварийной защиты;

• недогрев теплоносителя до температуры насыщения, величина которого переменная, в зависимости: 1) от соотношения расхода и мощности реактора; 2) от расхода отбираемого из БС пара и подаваемой в БС питательной воды, что создало предпосылки для усиления парообразования в нижней части зоны, где опасное влияние парового эффекта было наибольшим.

II. Показано, что перед аварией температура воды на входе в АЗ была выше штатной, что привело к росту паросодержания в ТК; способствовало росту мощности реактора при погружении в АЗ графитовых деталей СУЗ.

Литература

1. **Петреня Ю.К., Федорович Е.Д., Егоров М.Ю.** Проблемы теплогидравлики при создании энергооборудования // Сб. докл. XXXI Сиб. теплофизического семинара. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2014. С. 29–30.
2. **Александров А.А., Григорьев Б.А.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник. — 2-е изд., стер. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 158 с.
3. **Дятлов А.С.** Чернобыль. Как это было. М.: Научтехлитиздат, 2003. 191 с.

M.Yu. Egorov, V.V. Sergeev, E.D. Fedorovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29

THE ROLE OF THERMOPHYSICAL FACTORS ON THE OCCURRENCE AND COURSE OF THE CHERNOBYL NPP

УДК 621

В.М. Зайченко

Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Одной из главных задач при формировании приоритетных направлений развития энергетики еще сравнительно недавно было определение времени, на которое населению Земли хватит имеющихся запасов ископаемых топлив. Из прогнозных оценок считалось, что углем население земли обеспечено на 300 лет; природным газом на 50 лет, нефтью на 35.

Всемирная конференция ООН по климату (Conference Of the Parties – COP21) ставит целью ограничить рост глобальной температуры на планете в пределах 2 ºС к 2050 г. И это будет достигнуто только в том случае, если использовать к 2050 г. не более 10 % уже имеющихся на сегодня резервов углеродных топлив. В рамках обозначенных ограничений примерно 80 % мировых запасов угля, 50 % природного газа и 30 % нефти должны будут остаться вообще неиспользованными. По регионам мира это означает, что Китай и Индия не смогут использовать до 66 % имеющихся у них угольных резервов, страны Африки — 85 %, а США, Австралия и страны бывшего СССР — целых 90 % своих запасов угля. На Ближнем Востоке примерно 40 % нефти и более 60 % природного газа также останутся неиспользованными. В настоящее время подходы при определении приоритетных направлений развития энергетики претерпевают значительные изменения. Поскольку определенная часть ресурсов останется неиспользуемой, первоочередной задачей является определение запасов, которые могут быть реализованы с наименьшими затратами. Если данные подходы справедливы, то затраты на разведку новых месторождений ископаемых топлив не имеют экономического смысла, т.е. нужно финансировать не разведку и освоение новых месторождений, а исследования, направленные на создание новых методов получения энергии без использования природных ископаемых топлив.

В докладе рассмотрены основные задачи развития российской энергетики. Приведено технико-экономическое сравнение различных методов получения энергии для нашей страны. Основное внимание уделено вопросам, связанным с разработкой новых технологий исходя из существующих трендов развития энергетики. Определены наиболее перспективные направления исследований, обеспечивающих создание новых инновационных технологий, реализация которых в условиях нашей страны оказывается наиболее целесообразной с экономической точки зрения.

Показано, что создание распределенных энергетических систем оказывается более выгодным по сравнению с системами централизованного энергоснабжения. Тепловую энергию нельзя передавать на большие расстояния, в

силу этих причин производство тепловой энергии должно быть расположено вблизи потребителя. При совместной выработке электрической и тепловой энергии обеспечивается более высокая степень использования топлива.

При переходе на распределенное энергоснабжение становится возможным использование местных топливно-энергетических и возобновляемых ресурсов. Это дает значительные экономические преимущества по отношению к централизованному энергоснабжению и позволяет решить задачи, связанные с минимизацией использования ископаемых топлив.

V.M. Zaichenko

Joint Institute for High Temperature,
Russia, 125412, Moscow, Igorskay str., 13, Bldg. 2

PERSPECTIVE DIRECTIONS OF POWER DEVELOPMENT

УДК 538.248.2

А.Б. Сальманов[1], *Л.В. Романова*[1], *А.В. Полозов*[2]

[1]Высшая школа технологий и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4
[2]АО «Сегежский ЦБК», 186420, г. Сегежа, ул. Заводская, 1

ПРИРОДОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

В докладе представлены основные источники загрязняющих веществ (ЗВ) в выбросах, необходимость их предотвращения до поступления в атмосферу при сульфатном производстве целлюлозы и бумаги.

Сульфатной способ производства целлюлозы и бумаги является преобладающим, так как он обеспечивает возможность эффективной регенерации химических веществ. Однако он связан с проблемой образования дурнопахнущих серосодержащих соединений: сероводорода, метилмеркаптана, диметилсульфида, диметилдисульфида, поступающих с выбросами в атмосферу. Указанное производство характеризуется значительным количеством локальных источников выбросов, которые по условиям технологии соединены с атмосферой вытяжными трубами. Необходимость предотвращения выбросов ЗВ связана с тем, что они представляют собой высокотемпературную смесь паров и газов 2—3-го классов опасности, содержат в своем объеме щелочную или кислую капельную влагу, что обуславливает, в том числе, их разрушающее влияние на здания и сооружения из-за высоты вытяжных труб (не более 60 м). Самыми значительными их источниками являются содорегенерационный котлоагрегат (СРК) и его технологический узел — бак-растворитель плава (РП). В СРК проводят сжигание органической части черного щелока — вторичного продукта, образующегося в результате варки целлюлозы в РП-регенерацию натриевых солей. Количество парогазовой смеси (ПГС), образующейся в РП при растворении плава и далее поступающей в атмосферу, составляет 226 м^3 в пересчете на 1 тонну вырабатываемой целлюлозы. Количество химикатов в ПГС из РП составляет 4—5 кг/т сухого вещества (с.в.) щелока. Потери газообразных соединений серы с дымовыми газами СРК составляют от 30 до 75 % общего количества летучих соединений. Одной из общих тенденций развития целлюлозно-бумажного производства является снижение серосодержащих компонентов в выбросах из СРК и РП и расхода потребляемой энергии при максимальной выработке ее за счет внутренних ресурсов. При соответствии качества черного щелока, подаваемого на сжигание в СРК, нормативам можно увеличить выработку пара на 10 % и снизить температуру дымовых газов на 20 °С, увеличить восстановление сульфата в сульфид 95 %, что позволит уменьшить выбросы SO_2 и метилсернистых соединений. Такой режим работы СРК можно считать примером природоохранной технологии. В сульфат-

ном способе получения целлюлозы активные варочные реагенты (соединения натрия и серы) находятся в производственном кругообороте, поэтому ценные химикаты и тепло, которые теряются с выбросами, необходимо вернуть в цикл производства.

Выводы. Результаты промышленных и теоретических исследований показали, что предотвращение образования ЗВ в настоящее время является наиболее эффективным подходом по уменьшению воздействия их на окружающую среду, которого можно достичь за счет внедрения устройств для очистки выбросов и средств контроля их работы в технологическом процессе. В основу разработки ресурсосберегающей технологической системы должны быть положены следующие концепции: максимальное использование сырья; применение отходов в качестве вторичного сырья; совершенствование систем включающих устройства для очистки выбросов для уменьшения антропогенной нагрузки в районе расположения сульфатцеллюлозного производства.

Литература

1. **Романова Л.В.** Оценка эколога экономической эффективности инвестиций в проекты по охране атмосферного воздуха // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2014. № 7. С. 82—83.
2. **Личугина Т.Ф., Гусакова М.А., Вишнякова А.П.** Оценка фактического состояния газовых выбросов в атмосферу на предприятиях ЦБП Северо-Запада России в соответствии нормативам ЕС// Целлюлоза. Бумага. Картон. 2009. № 3. С. 69—74.
3. **Романова Л.В., Романов А.В.** Источники выбросов сульфат-целлюлозного производства. Качественный и количественный состав выбросов // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2009. № 3. С. 75—80.

A.B. Salmanov[1], *L.V. Romanova*[1], *A.V. Polozov*[2]

[1]Higher School of Technology and Energy SPbSUITD,
Russia, 198095, St. Petersburg, Ivan Chernykh str., 4

[2]Segezha Pulp and Paper Mill JS,
Russia, Republic of Karelia, 186420, Segezha, Zavodskaya str., 1

ENERGY SAVING TECHNOLOGIES

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абрамов А.А. Т.1: 97
Авдонина Е.А. Т.1: 166
Агапов К.В. Т.2: 153
Агафонова Н.Д. Т.2: 155
Агеев А.И. Т.1: 83
Агишев Б.Ю. Т.1: 85
Азанов Г.М. Т.1: 183
Аксенов П.Л. Т.2: 157
Алексеев М.В. Т.1: 201
Алексеев Ю.И. Т.2: 27
Альмяшев В.И. Т.1: 269
Аманбаева Д.Г. Т.1: 185
Амбарцумян Д.С. Т.2: 63
Ананьев П.А. Т.2: 159
Андросович А.Н. Т.2: 112
Анисимова Е.Д. Т.1: 148
Анисин А.А. Т.2: 65
Аношина А.Г. Т.1: 23
Ануфриев И.С. Т.2: 11, 67
Арефьев В.К. Т.1: 187, 189
Арзамасцев А.Г. Т.1: 217, 219; Т.2: 88
Аронсон К.Э. Т.1: 251
Арсентьев С.С. Т.2: 11
Арутюнян Г.А. Т.2: 234
Архипов В.А. Т.1: 191
Аттетков А.В. Т.2: 13
Афанасьев В.Н. Т.2: 107
Ахметшин Р.И. Т.2: 193

Б

Бабич А.Ю. Т.1: 141; Т.2: 119
Бабкин Д.Н. Т.1: 23
Баженова А.В. Т.2: 112
Базюк С.С. Т.2: 161, 164
Баисов А.М. Т.1: 87
Байрамуков А.Ш. Т.2: 167
Байтимиров А.Д. Т.2: 69
Баранов П.А. Т.1: 47
Бараховская Э.В. Т.1: 89
Баринов А.А. Т.1: 91
Барткус Г.В. Т.2: 71
Басалаев С.А. Т.1: 191
Баскаков В.Н. Т.2: 217
Басов А.А. Т.2: 15
Басов А.О. Т.2: 230
Батенин В.М. Т.1: 27
Башкатов А.В. Т.1: 141
Башкатов А.В. Т.2: 118, 221
Беленький М.Я. Т.1: 23
Белов К.И. Т.1: 193
Белозеров Б.В. Т.1: 255
Беляев А.В. Т.2: 73
Беляев И.А. Т.1: 27
Бердов Р.Д. Т.2: 169
Бильский А.В. Т.2: 103, 149
Бирюков Д.А. Т.1: 27
Блинов А.С. Т.2: 120
Блинов Д.В. Т.1: 195
Блинов М.А. Т.1: 23
Богатко Т.В. Т.1: 93
Бойков Д.В. Т.2: 222
Болкисев А.А. Т.2: 29
Болога М.К. Т.1: 78
Бондарева Н.С. Т.1: 95
Бондаренко Д.А. Т.1: 25
Борзенко В.И. Т.1: 195
Бороздин А.В. Т.2: 75
Боронин С.А. Т.1: 255
Бочкарева Е.М. Т.1: 197
Бояркин М.С. Т.2: 171
Брдынкевич Д.В. Т.2: 159
Буданов Р.Е. Т.2: 126, 230
Бурцев С.А. Т.1: 29; Т.2: 98
Бусов К.А. Т.1: 199, 259
Бутов А.А. Т.1: 170
Быльев С.Ю. Т.1: 23

В

Варава А.Н. Т.2: 183
Василевский Э.Б. Т.2: 63
Васильев Н.В. Т.2: 77
Веремеев А.А. Т.1: 97
Веретенников С.В. Т.2: 94, 124, 240
Вершинина К.Ю. Т.2: 17
Веткин А.В. Т.2: 19
Вигдорович И.И. Т.1: 45
Виноградов Д.А. Т.1: 72, 99
Виноградов Ю.А. Т.1: 33; Т.2: 98, 250

Винцаревич А.В. Т.2: 79
Вожаков И.С. Т.1: 201
Волгин В.С. Т.2: 173
Волгин Я.С. Т.1: 203
Волков И.К. Т.2: 13
Волков Н.Н. Т.2: 169, 217
Волкова Л.И. Т.2: 169, 217
Волкова Ю.В. Т.2: 228
Воробьёв М.А. Т.1: 205
Вотинов П.Р. Т.1: 207, 209
Вязов Ю.Н. 207, 209

Г

Гаврилов А.А. Т.1: 176
Гавриш А.С. Т.2: 175
Газизов И.М. Т.2: 80, 181
Гайдаенко К.А. Т.2: 13
Галеев Р.Р. Т.1: 255
Гарбарук А.В. Т.1: 105, 109, 146, 168
Гатапова Е.Я. Т.1: 211, 215, 253, 287
Герасимов А.В. Т.2: 69
Герасимов Д.Н. Т.1: 213
Гибанов Н.С. Т.1: 101
Гимбицкий А.В. Т.2: 82
Гиневский А.Ф. Т.1: 203; Т.2: 173
Глазков В.В. Т.1: 162
Глазов В.С. Т.2: 252
Глуздов Д.С. Т.1: 215
Глушков Д.О. Т.2: 21
Глушков Т.Д. Т.1: 47
Голиков В.А. Т.2: 112
Голов П.В. Т.2: 159, 213
Голосов Р.Е. Т.2: 230
Голубкина И.В. Т.1: 83
Гольцман А.Е. Т.2: 84
Горинович Н.В. Т.2: 86
Городнов А.О. Т.1: 103
Горский Ю.А. Т.2: 177
Готовский М.А. Т.1: 74
Греков М.А. Т.1: 141; Т.2: 118
Грицкевич М.С. Т.1: 105
Гришин Ю.А. Т.2: 179
Губарев В.Я. Т.1: 217, 219; Т.2: 88
Гузей Д.В. Т.1: 107, 261
Гурина И.Н. Т.2: 169
Гурьянов А.И. Т.1: 225
Гурьянова М.М. Т.2: 53
Гусаков А.А. Т.1: 141; Т.2: 118, 221
Гусаров В.В. Т.1: 269
Гусева Е.К. Т.1: 109

Д

Давлетшин И.А. Т.2: 181
Данин В.В. Т.1: 23
Дашков Г.В. Т.1: 49
Дедов А.В. Т.1: 31, 166, 279; Т.2: 73
Деев В.И. Т.1: 87
Дезидерьев С.Г. Т.1: 53; Т.2: 82
Дектерев Д.А. Т.2: 244
Денежкин А.О. Т.1: 85
Деревич И.В. Т.1: 11
Дермер П.Б. Т.2: 90
Дерябин И.А. Т.2: 161, 164
Добриянов С.К. Т.2: 217
Дорож Ю.С. Т.2: 267
Дугаров Г.А. Т.1: 170
Дулин В.М. Т.1: 125; Т.2: 41, 57
Дуников Д.О. Т.2: 153
Душин Н.С. Т.2: 92
Дымкин А.Н. Т.2: 118, 221
Дьяченко А.Ю. Т.1: 93

Е

Евдокимов О.А. Т.1: 271; Т.2: 94
Егоров М.Ю. Т.1: 74, 187, 189;
Т.2: 155, 157, 285
Ежов И.В. Т.2: 63
Елистратов Д.С. Т.1: 245, 247
Емец А.А. Т.1: 271; Т.2: 94
Ершов М.И. Т.2: 228

Ж

Жарков М.Ю. Т.2: 183
Жарова И.К. Т.1: 139
Жданова А.О. Т.2: 23
Жигарев В.А. Т.2: 185
Жилин А.Е. Т.1: 263
Жилкин Б.П. Т.1: 259; Т.2 59
Жуков В.И. Т.1: 185
Жуков В.М. Т.1: 193, 223, 241
Журавский А.В. Т.2: 49

З

Забиров А.Р. Т.1: 221
Заграй И.А. Т.2: 39

Зайнуллина Э.Р. Т.1: 141; Т.2: 119
Зайченко В.М. Т.2: 287
Зарубин В.С. Т.2: 187
Засимова М.А. Т.1: 111
Захаров М.С. Т.1: 243
Захаров Н.С. Т.2: 195
Здитовец А.Г. Т.1: 33
Зеленцов А.А. Т.1: 51
Зимин А.Р. Т.2: 25
Золотов А.Н. Т.1: 113
Золотова К.П. Т.1: 113
Золоторёв Н.Н. Т.1: 191
Золотухин А.В. Т.2: 189
Зуй О.Н. Т.2: 47

И

Иванов Н.Г. Т.1: 111, 133, 178
Иванов Н.С. Т.1: 223
Иванова В.А. Т.2: 191
Ивонин Д.В. Т.2: 161
Ивочкин Ю.П. Т.1: 72, 99, 239
Игнатьев А.А. Т.1: 23
Ильин В.В. Т.1: 115
Ильинков А.В. Т.2: 193
Ильинская О.И. Т.2: 112
Исаев С.А. Т.1: 39, 47

К

Казаков А.Н. Т.2: 96, 259
Калинин Е.И. Т.1: 156
Калинина К.Л. Т.1: 225
Калита В.И. Т.1: 273
Калмыков К.С. Т.2: 118, 119
Калякин Д.С. Т.2: 226
Камбур М.П. Т.2: 27
Камбур П.С. Т.2: 27
Каменов П.К. Т.1: 227
Канин П.К. Т.1: 221
Капустин В.В. Т.1: 62; Т.2: 27
Каримова А.Г. Т.1: 53; Т.2: 82
Карлов С.П. Т.2: 195
Карпов А.И. Т.2: 29
Карпов П.Н. Т.1: 229
Карпухина Т.В. Т.1: 233
Картуесова А.Ю. Т.2: 159, 213
Кашинский О.Н. Т.1: 205
Кирпичников А.П. Т.2: 69
Киселев И.Н. Т.2: 100, 101
Киселёв Н.А. Т.1: 33; Т.2: 98
Киселёв С.Д. Т.2: 164
Китанин Э.Л. Т.1: 25
Китанина Е.Э. Т.1: 25
Клейманов Р.В. Т.2: 100, 101, 140
Клементьева И.Б. Т.1: 72, 99
Ковалёв А.В. Т.2: 103, 149
Ковальногов В.Н. Т.1: 113,172, 233;
Т.2: 171, 263, 270
Кожевников И.В. Т.1: 78
Кожухов Н.Н. Т.2: 207
Козлов Е.А. Т.1: 139
Козулин И.А. Т.1: 231; Т.2: 105
Коковина Е.С. Т.2: 31, 35
Колесник Е.В. Т.1: 117
Колобаева П.В. Т.2: 197
Комлев Д.И. Т.1: 273
Комов А.Т. Т.1: 85, 115; Т.2: 75
Кон Дехай Т.2: 107
Кондратьев А.В. Т.1: 249;
Т.2: 109, 116, 256
Коновалов Д.А. Т.2: 205, 207
Кононова В.В. Т.2: 33
Конюшин М.В. Т.2: 199
Копьев Е.П. Т.2: 11
Корбанова Е.Г. Т.1: 211
Корженевская И.А. Т.2: 232
Корлякова Е.Ю. Т.2: 109
Корныльев М.Г. Т.1: 233
Коротеев А.А. Т.1: 235
Корсун А.С. Т.1: 160
Корценштейн Н.М. Т.1: 257
Корчагова В.Н. Т.1: 119
Коршунов А.В. Т.2: 100, 101, 140
Костычев П.В. Т.1: 121
Кочев Н.С. Т.1: 259
Кочуров Д.С. Т.1: 123
Кравцов З.Д. Т.1: 125
Кравцов П.А. Т.1: 25
Крайнов А.Ю. Т.2: 45
Крайнова И.В. Т.2: 201
Кректунов О.П. Т.1: 23
Крета А.С. Т.1: 237
Крылов А.Н. Т.1: 127
Крылов В.С. Т.2: 116, 256
Крюков А.П. Т.1: 13
Кубриков К.Г. Т.1: 239

Кудашов И.Г. Т.1: 277
Кузма-Кичта Ю.А. Т.1: 223, 241; Т.2: 164
Кузнецов В.А. Т.2: 37
Кузнецов В.В. Т.1: 15, 231; Т.2: 71, 105
Кузнецов Г.В. Т.2: 23, 203
Кузнецов Д.В. Т.1: 273
Кузнецов Е.А. Т.2: 31, 35
Кузьмин В.А. Т.2: 39
Кузьмина К.С. Т.1: 129, 131
Кулиш А.В. Т.1: 97
Кунаева А.И. Т.1: 133
Куслин К.В. Т.2: 96
Кутлиметов А.А. Т.1: 277

Л

Лавриков А.В. Т.1: 223, 241
Лазаренко И.Н. Т.2: 205, 207
Лаптев И.В. Т.1: 103, 135
Лашова А.А. Т.2: 59
Лебедев М.Е. Т.1: 23
Левашов В.Ю. Т.1: 13, 227
Лежнин С.И. Т.1: 201
Лексин М.А. Т.2: 15
Леманов В.В. Т.2: 145
Ленев С.Н. Т.2: 159, 213
Леньков В.А. Т.1: 193
Леонтьев Д.Д. Т.2: 111
Лепешкин А.Р. Т.2: 112
Леухин Ю.Л. Т.2: 130
Липнягов Е.В. Т.1: 243
Лисянская М.В. Т.2: 47
Лиханский В.В. Т.2: 161
Лобанов П.Д. Т.1: 205, 277
Лобасов А.С. Т.2: 41
Ложкин Н.С. Т.2: 126
Лущик В.Г. Т.1: 41, 137
Львов Е.А. Т.1: 148
Лю Б. Т.1: 91
Люблинский И.Е. Т.2: 183
Люлин Ю.В. Т.1: 237; Т.2: 136

М

Мажейко Н.А. Т.1: 199, 259
Мазо А.Б. Т.1: 156
Макаров М.С. Т.2: 114, 209
Макарова М.С. Т.1: 41, 137;
Макарова С.Н. Т.2: 114, 209
Маластовский Н.С. Т.2: 120
Манчха С.П. Т.1: 27
Маратканова Е.И. Т.2: 39
Мардарский О.И. Т.1: 78
Маркович Д.М. Т.1: 125; Т.2: 41, 57
Мартиросян А.А. Т.2: 211
Марчевский И.К. Т.1: 129, 131
Марчук И.В. Т.1: 89
Марьина З.Г. Т.1: 148
Маслов Е.А. Т.1: 139
Матюшенко А.А. Т.1: 105
Мелешкин А.В. Т.1: 245, 247
Ментер Ф. Т.1: 146
Мешков К.Н. Т.1: 107
Мильман О.О. Т.1: 249; Т.2: 116, 213, 215
Мильто О.А. Т.2: 118, 119
Минаков А.В. Т.1: 107, 261; Т.2: 149, 185, 244
Миронов В.В. Т.2: 169, 217
Мирошниченко И.В. Т.2: 43
Мисник М.О. Т.2: 219
Миськив Н.Б. Т.1: 197
Мисюра Т.А. Т.2: 175
Митрофанова О.В. Т.1: 56; Т.2: 167, 248
Митяков А.В. Т.2: 79, 221
Митяков В.Ю. Т.1: 141; Т.2: 118, 119, 221
Михайлов В.Е. Т.1: 74
Михайлов Е.А. Т.1: 142
Михеев А.Н. Т.1: 144
Михеев Н.И. Т.1: 58, 144; Т.2: 80, 84
Михиенкова Е.И. Т.2: 222
Мишин М.В. Т.2: 101
Моисеева К.М. Т.2: 45
Мокрушин А.А. Т.2: 164
Молочников В.М. Т.1: 144
Морева Ю.О. Т.1: 217
Моржухина А.В. Т.2: 224
Морозов А.В. Т.2: 226
Моррисон Д. Т.1: 25
Мунц В.А. Т.2: 228
Мурманский И.Б. Т.1: 251
Мухортов Д.А. Т.2: 27
Мягков Л.Л. Т.2: 120

Н

Назаров А.Д. Т.1: 197
Назаров В.В. Т.2: 112
Назарова О.В. Т.2: 265
Налётов И.Д. Т.2: 79
Неверов А.Л. Т.2: 185
Неволин А.М. Т.2: 219
Некрасов Д.А. Т.2: 195
Необъявляющий П.А. Т.2: 222
Нетелев А.В. Т.1: 60
Никитин М.Н. Т.2: 274
Никитина И.С. Т.1: 27
Никифоров М.А. Т.2: 122
Никифорова К.В. Т.1: 146
Новикова А.Н. Т.1: 253
Новикова К.С. Т.2: 124
Новожилова А.В. Т.1: 148
Нужин В.Н. Т.2: 161

О

Образ А.О. Т.1: 150
Онищенко Д.О. Т.1: 35, 152, 154;
Т.2: 126, 230, 232, 234
Онохин Д.А. Т.2: 236
Орлов С.Е. Т.1: 191
Орловская С.Г. Т.2: 47
Осипцов А.А. Т.1: 255
Осипцов А.Н. Т.1: 19, 83, 183
Османов В.В. Т.1: 187
Охотников Д.И. Т.1: 156

П

Павленко А.Н. Т.1: 17, 185, 273
Павлов А.В. Т.2: 118
Паерелий А.А. Т.2: 181
Палащенко А.Н. Т.2: 128
Пальчековская Н.В. Т.2: 238
Панкратов Е.В. Т.2: 130
Панкратов С.А. Т.1: 152, 154
Панов Д.О. Т.1: 158
Папулов А.П. Т.2: 67
Парамонова И.Л. Т.2: 155, 278
Паршакова М.А. Т.1: 243
Паршин Н.Я. Т.2: 164
Пахолков В.В. Т.1: 127
Пашкевич Д.С. Т.1: 62; Т.2: 25, 27
Пелевин Ф.В. Т.1: 64
Перминов С.А. Т.1: 243
Першина Ю.В. Т.2: 132
Петреня Ю.К. Т.1: 74, 187
Петров В.Б. Т.2: 27
Петров Л.В. Т.1: 257
Печенегов Ю.Я. Т.2: 132
Пильник А.А. Т.1: 245, 247
Пиралишвили Ш.А. Т.2: 240, 242, 254
Пискунов М.В. Т.2: 203
Питык А.В. Т.2: 226
Платонов Д.В. Т.2: 244
Плетнев А.А. Т.2: 177
Плотников Л.В. Т.1: 259; Т.2: 219
Плотников Н.С. Т.2: 228
Повалихина О.В. Т.1: 21
Пожилов А.А. Т.2: 246
Поздеева И.Г. Т.2: 248
Полозов А.В. Т.2: 289
Пономарёв А.В. Т.1: 64
Пономаренко Т.Г. Т.1: 283
Попов Е.Б. Т.2: 164
Попович С.С. Т.2: 250
Потехин И.В. Т.1: 174
Прибатурин Н.А. Т.1: 201, 277
Продан Д.В. Т.1: 135
Протасов Н.О. Т.2: 252
Прохоров Д.А. Т.2: 254
Прохоров Н.А. Т.1: 23
Прохоров Ю.М. Т.2: 15
Пряжников М.И. Т.1: 261
Птахин А.В. Т.1: 263; Т.2: 116, 215, 256
Пузина Ю.Ю. Т.1: 13, 227, 239
Пыхтина А.И. Т.2: 259
Пятницкая Н.Ю. Т.1: 27; Т.2: 134

Р

Рагулин С.В. Т.2: 226
Разуванов Н.Г. Т.1: 27, 121; Т.2: 134
Ракитин А.С. Т.2: 258
Резник В.В. Т.2: 195
Репухов В.М.Т.1: 66
Решетников А.В. Т.1: 199,259
Рогожкин С.А. Т.1: 127
Родионов С.Г. Т.2: 242
Романов И.А. Т.2: 96, 259
Романова Л.В. Т.2: 289
Роньшин Ф.В. Т.1: 265
Руднев Б.И. Т.1: 21

Рудой И.А. Т.2: 261
Рыжков А.Ф. Т.2: 55
Рятина Е.П. Т.1: 131

С

Сабирова Ф.Р. Т.2: 69
Сабуров Э.Н. Т.2: 236
Савельева И.Ю. Т.2: 49
Салосина М.О. Т.2: 51
Сальманов А.Б. Т.2: 289
Сапич В.Н. Т.2: 65
Сапожников И.С. Т.1: 160
Саушин И.И. Т.2: 84
Сафонов Р.А. Т.2: 234
Сафронов А.А. Т.1: 235
Свешников М.В. Т.1: 162
Свиридов В.Г. Т.1: 27
Свиридов Е.В. Т.1: 27; Т.2: 134
Седов М.И. Т.2: 256
Семашко С.Е. Т.1: 23
Семенев П.А. Т.2: 107
Семенчукова В.С. Т.2: 179
Сергеев В.В. Т.1: 74, 187, 269;
Т.2: 155, 199, 285
Сергеева Е.С. Т.2: 187
Сердюков В.С. Т.1: 273; Т.2: 138
Сероштанов В.В. Т.1: 141; Т.2: 118, 221
Сидоров А.А. Т.1: 267
Симоновский А.Я. Т.2: 128
Синкевич О.А. Т.1: 68, 162
Сироткина А.Л. Т.1: 269
Ситкин П.К. Т.2: 140
Ситников А.Н. Т.1: 255
Смирнов Е.М. Т.1: 117
Смирнов П.Е. Т.1: 146
Смирнов С.И. Т.1: 164
Смирновский А.А. Т.1: 164
Сморчкова Ю.В. Т.1: 166
Смульский Я.И. Т.1: 93
Снегирёв А.Ю. Т.2: 31, 35
Соколов Д.О. Т.2: 183
Солдаткин Д.М. Т.2: 161, 164
Солодухин А.Д. Т.1: 49
Сомони С. Т.1: 271
Спесивцев С.Е. Т.2: 136
Стабников А.С. Т.1: 168
Стерлягов А.Н. Т.2: 141
Стрелец М.Х. Т.1: 109
Стрижак П.А. Т.2: 17, 21, 203
Стронгин М.М. Т.1: 33; Т.2: 98, 250
Судаков А.В. Т.1: 74
Супельняк М.И. Т.1: 70
Суранов Д.В. Т.2: 263
Суртаев А.С. Т.1: 17, 273; Т.2: 138
Сухих А.А. Т.2: 122
Сухоруков Ю.Г. Т.1: 74
Счастливцев А.И. Т.2: 265

Т

Такмовцев В.В. Т.2: 193
Талагаева А.С. Т.2: 267
Талалов В.А. Т.2: 27
Тарасевич С.Э. Т.2: 278
Тепляков Е.А. Т.2: 269
Тепляков И.О. Т.1: 72, 99, 142
Терехов В.В. Т.1: 197
Терехов В.И. Т.1: 93
Тимофеева К.Р. Т.2: 53
Токарев С.А. Т.2: 161
Токарев Ю.Н. Т.1: 115
Толмачёва К.И. Т.1: 255
Томин А.С. Т.2: 143
Тонконог В.Г. Т.1: 275
Тукмакова Н.А. Т.1: 275
Туманов В.В. Т.1: 273
Турутько А.И. Т.2: 217

У

Усанина А.С. Т.1: 191
Усачов А.Е. Т.1: 47
Усов Э.В. Т.1: 170, 277
Устинов А.А. Т.1: 223

Ф

Фадеев И.Д. Т.1: 127
Фарапонов В.В. Т.1: 139
Фасхиев В.Н. Т.2: 59
Фёдоров А.В. Т.1: 150
Фёдоров Р.В. Т.1: 172; Т.2: 270
Федорович Е.Д. Т.1: 62, 74, 269;
Т.2: 155, 199, 285
Филимонов С.А. Т.2: 222
Филиппов П.С. Т.2: 55
Фролко П.А. Т.2: 272
Фролов Г.Ю. Т.1: 239

Х

Хабенский В.Б. Т.1: 269
Хабибуллин И.И. Т.2: 193
Хажиев З.З. Т.2: 145
Хазиев И.А. Т.1: 279
Хазов Д.Е. Т.1: 76
Хахалева Л.В. Т.2: 270
Ходаков К.А. Т.2: 77
Храбрый А.И. Т.2: 246
Храмцов Д.П. Т.1: 281
Храпунов Е.Ф. Т.1: 174
Хрущенко А.А. Т.1: 187, 189

Ц

Царева К.В. Т.2: 269
Цынаева А.А. Т.2: 274
Цынаева Е.А. Т.2: 274

Ч

Чан Б.Л.Х. Т.2: 183
Чебаков Е.В. Т.2: 201
Чеверда В.В. Т.1: 265, 283
Черкасов С.Г. Т.1: 103
Чернецкий М.Ю. Т.2: 37
Черника И.М. Т.1: 78
Чернов А.А. Т.1: 245, 247
Черных А.В. Т.2: 147, 276
Чернявский А.Н. Т.2: 138
Чжан К. Т.1: 91
Чикишев Л.М. Т.2: 41
Чукалин А.В. Т.1: 172; Т.2: 270
Чумаков Ю.С. Т.1: 174
Чупашев А.А. Т.1: 139
Чухно В.И. Т.1: 277

Ш

Шадрин Е.Ю. Т.2: 67
Шайкина А.А. Т.2: 191
Шаклеин А.А. Т.2: 29
Шанин Ю.И. Т.2: 147, 276
Шараборин Д.К. Т.1: 125; Т.2: 57
Шарапов И.С. Т.2: 147, 276
Шарыпов О.В. Т.2: 11, 67
Шебелев А.В. Т.1: 176
Шебелева А.А. Т.2: 149
Шевелева Ю.В. Т.2: 161
Шевченко А.Н. Т.2: 175
Шеремет М.А. Т.1: 95, 101; Т.2: 43
Шибаев А.А. Т.2: 114, 209
Шипулина А.С. Т.1: 219
Шифрин Б.А. Т.2: 213
Шишкин А.В. Т.1: 285
Шишкова И.Н. Т.1: 13
Шкрыгунова Е.В. Т.2: 278
Шкуратенко А.А. Т.2: 281
Шлейфер В.А. Т.1: 23
Шлюпиков М.Ю. Т.2: 141
Шмыгалев А.С. Т.2: 59
Шонина А.М. Т.1: 287
Шумаев В.В. Т.2: 272
Шумейко А.А. Т.2: 86
Шустов М.В. Т.1: 241

Щ

Щелчков А.В. Т.1: 39
Щукин А.В. Т.2: 193

Ю

Юрас С.Ф. Т.1: 23
Юрин Е.И. Т.1: 213
Юхнев А.Д. Т.1: 158

Я

Ягов В.В. Т.1: 221
Ягодницына А.А. Т.2: 103, 149
Яковлев А.А. Т.1: 255
Яковлев А.Б. Т.2: 278
Ярославцева Н.А. Т.1: 178
Ярцев А.Г. Т.2: 88
Ярыгин И.В. Т.1: 207, 209
Ястребов А.К. Т.1: 267

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 3
СЛОЖНЫЙ, РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН И ГОРЕНИЕ

Ануфриев И.С., Арсентьев С.С., Копьев Е.П., Шарыпов О.В.
Исследование процессов сжигания жидких углеводородов в присутствии перегретого водяного пара 11

Аттетков А.В., Волков И.К., Гайдаенко К.А.
Иерархия математических моделей процесса теплопереноса в твердом теле со сферическим очагом разогрева, подвижная граница которого обладает пленочным покрытием 13

Басов А.А., Лексин М.А., Прохоров Ю.М.
Теплопередающий элемент радиационного теплообменника для двухфазного контура космического аппарата 15

Вершинина К.Ю., Стрижак П.А.
Влияние добавки жидкого горючего компонента на характеристики зажигания водоугольных топливных суспензий 17

Веткин А.В.
Исследование температуры перевала в трубчатой печи при горении газообразных топлив 19

Глушков Д.О., Стрижак П.А.
Тепломассоперенос при зажигании полимерного материала нагретой до высоких температур частицей 21

Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.
Определение условий эффективного тушения лесных горючих материалов пленкой и малой группой капель 23

Зимин А.Р., Пашкевич Д.С.
Термодинамические основы восстановления гексафторида урана в режиме горения 25

Капустин В.В., Пашкевич Д.С., Алексеев Ю.И., Петров В.Б., Мухортов Д.А., Камбур П.С., Камбур М.П., Талалов В.А.
Получение безводного фторида водорода из плавиковой кислоты на основе реакции водяного газа в режиме гетерогенного горения 27

Карпов А.И., Шаклеин А.А., Болкисев А.А.
Численное моделирование процессов тепломассопереноса при распространении пламени по вертикальной поверхности горючего материала 29

Коковина Е.С., Кузнецов Е.А., Снегирёв А.Ю.
Режимы распространения пламени по поверхности горючих материалов 31

Кононова В.В., Гурьянов А.И.
Экспериментальное исследование горения смешанного и синтетического топлива в противоточном горелочном модуле 33

Кузнецов Е.А., Коковина Е.С., Снегирев А.Ю.
Численное моделирование самоподдерживающегося горения термопластика: роль сеточного разрешения температурных градиентов у поверхности материала..... 35

Кузнецов В.А., Чернецкий М.Ю.
Численное исследование процессов тепломассобмена при горении пылеугольного топлива в топочной камере с вихревой горелкой на основе вихреразрешающих методов моделирования турбулентности 37

Кузьмин В.А., Заграй И.А., Маратканова Е.И.
Комплексное исследование теплового излучения при пылевом сжигании торфа в топке парового котла БКЗ-210-140Ф 39

Лобасов А.С., Дулин В.М., Чикишев Л.М., Маркович Д.М.
Исследование турбулентного горения в закрученной струе панорамными оптическими методами 41

Мирошниченко И.В., Шеремет М.А.
Турбулентные режимы естественной конвекции и теплового поверхностного излучения в замкнутом кубе 43

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.
Моделирование тепловых процессов при искровом зажигании аэровзвеси угольной пыли 45

Орловская С.Г., Зуй О.Н., Лисянская М.В.
Воспламенение и горение двухфракционной газовзвеси углеродных частиц 47

Савельева И.Ю., Журавский А.В.
О моделировании процесса теплопроводности в пластине при газофазном осаждении материала на ее поверхность..... 49

Салосина М.О.
Проектирование тепловой защиты солнечного зонда..... 51

Тимофеева К.Р., Гурьянова М.М.
Численное моделирование аэродинамики отрывного диффузора камеры сгорания ГТД с учетом взаимодействия потока в кольцевых каналах и течением в объеме жаровой трубы 53

Филиппов П.С., Рыжков А.Ф.
Верификация моделей теплопередачи излучением при горении газового топлива в камере сгорания 55

Шараборин Д.К., Дулин В.М., Маркович Д.М.
Исследование тепломассообмена в закрученном пламени..... 57

Шмыгалев А.С., Фасхиев В.Н., Лашова А.А., Жилкин Б.П.
Зависимость теплофизических свойств инфракрасных световодов от состава исходных кристаллов 59

Секция 4
МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА

Амбарцумян Д.С., Василевский Э.Б., Ежов И.В.
Экспериментальные исследования встречного вдува газа через переднюю кромку слабо притупленного клина в высокоскоростной поток 63

Анисин А.А., Сапич В.Н.
Эффективность теплоотдачи поверхности поперечно обтекаемых пучков труб и профилированных каналов со сложной геометрией в потоке воздуха 65

Ануфриев И.С., Папулов А.П., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В.
Исследование внутренней аэродинамики модели четырехвихревой топки 67

Байтимиров А.Д., Герасимов А.В., Кирпичников А.П., Сабирова Ф.Р.
О разности электронной и атомно-ионной температур на границе дугового разряда 69

Барткус Г.В., Кузнецов В.В.
Экспериментальное исследование локальных характеристик газожидкостного течения в прямоугольном микроканале 71

Беляев А.В., Дедов А.В.
Экспериментальное исследование кризиса теплообмена при кипении в мини-каналах в условиях высоких приведенных давлений 73

Бороздин А.В., Комов А.Т.
Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в цилиндрической шаровой засыпке 75

Васильев Н.В., Ходаков К.А.
Исследование кипения недогретого до температуры насыщения хладона Novec 649 как метода интенсивного охлаждения высокотеплонапряженных компьютерных кластеров 77

Винцаревич А.В., Налётов И.Д., Митяков А.В.
Градиентная теплометрия как метод мониторинга для дизельного двигателя .....

Газизов И.М., Михеев Н.И.
Способ и устройство измерения распределения коэффициента теплоотдачи 80

Гимбицкий А.В., Каримова А.Г., Дезидерьев С.Г.
Экспериментальное исследование теплоотдачи при создании воздушной завесы пористым вдувом 82

Гольцман А.Е., Михеев Н.И., Саушин И.И.
Исследование турбулентного пограничного слоя на пульсирующих режимах течения оптическим методом SIV 84

Горинович Н.В., Шумейко А.А.
Исследование круглой струи воздуха при низких числах Рейнольдса 86

Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г., Ярцев А.Г.
Исследование интенсификации теплообмена в каналах при использовании ребер-турбулизаторов 88

Дермер П.Б.
Экспериментальное исследование условий генерации нестационарных огненных вихрей..... 90

Душин Н.С.
Применение метода SIV для измерения турбулентных пульсаций скорости при обтекании обратного уступа..... 92

Евдокимов О.А., Веретенников С.В., Емец А.А.
Применение вихревого прямоточного эжектора для организации вакуумирования и очистки топливных форсунок ГТД 94

Казаков А.Н., Романов И.А., Куслин К.В.
Применимость динамического метода к измерениям PCT-свойств металлогидридов 96

Киселёв Н.А., Бурцев С.А., Стронгин М.М., Виноградов Ю.А.
Экспериментальное исследование теплообмена и сопротивления лунок сложной формы 98

Киселёв И.Н., Клейманов Р.В., Коршунов А.В.
Управление течением холодной плазмой в диффузорном канале 100

Киселёв И.Н., Клейманов Р.В., Коршунов А.В., Мишин М.В.
Влияние теплообмена на процессы химического осаждения наночастиц из газовой фазы 101

Ковалев А.В., Ягодницына А.А., Бильский А.В.
Экспериментальное исследование снарядного режима течения касторовое масло — вода в прямых и серпантинных микроканалах..... 103

Козулин И.А., Кузнецов В.В.
Экспериментальное исследование стационарного течения смеси азот/вода в горизонтальном прямоугольном микроканале..... 105

Кон Дехай, Семенев П.А., Афанасьев В.Н.
Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при турбулентном обтекании одиночной лунки..... 107

Кондратьев А.В., Корлякова Е.Ю.
Методика обработки результатов промышленных тепловых испытаний сухих градирен и воздушных конденсаторов..... 109

Леонтьев Д.Д.
Использование датчиков динамического давления в экспериментах на ударной трубе 111

Лепешкин А.Р., Баженова А.В., Андросович А.Н., Голиков В.А., Ильинская О.И., Назаров В.В.
Особенности моделирования нестационарного теплового и термонапряженного состояния охлаждаемых лопаток турбин ГТД с ТЗП с использованием тепловизионной системы 112

Макаров М.С., Макарова С.Н., Шибаев А.А.
Тепломассообмен при сублимации одиночных частиц летучих бета-дикетонатов металлов 114

Мильман О.О., Крылов В.С., Птахин А.В., Кондратьев А.В.
Исследование высокоэффективного конденсатора для конденсации парогазовой смеси с массовым содержанием неконденсирующихся газов до 20% 116

Митяков В.Ю., Греков М.А., Гусаков А.А.,Сероштанов В.В., Башкатов А.В., Дымкин А.Н., Павлов А.В., Мильто О.А., Калмыков К.С.
Комплексное исследование течения и теплообмена у поверхности изотермического и неизотермического прямого ребра 118

Митяков В.Ю., Зайнуллина Э.Р., Бабич А.Ю., Мильто О.А., Калмыков К.С.
Градиентная теплометрия при исследовании конденсации на поверхности труб 119

Мягков Л.Л., Маластовский Н.С., Блинов А.С.
Испарение водного раствора и распад мочевины в системе обработки отработавших газов дизеля 120

Никифоров М.А., Сухих А.А.
Определение температурного поля многослойной тепловой изоляции 122

Новикова К.С., Веретенников С.В.
Нестационарность рабочего процесса вихревых труб и акустическое излучение 124

Онищенко Д.О., Буданов Р.Е., Ложкин Н.С.
Разработка методики расчета теплонапряженного состояния крышки цилиндра дизеля ЧН21/21 126

Палащенко А.Н., Симоновский А.Я.
Теплообмен и гидродинамика процессов охлаждения ферромагнитного шара в магнитной жидкости 128

Панкратов Е.В., Леухин Ю.Л.
Влияние уменьшения площади поперечного сечения кольцевого канала рекуператора на эксплуатационную надежность рекуперативной горелки 130

Печенегов Ю.Я., Першина Ю.В.
Теплогидравлические характеристики закрученных потоков в трубах теплообменных аппаратов 132

Пятницкая Н.Ю., Свиридов Е.В., Разуванов Н.Г.
Исследование подъемного и опускного течения жидкого металла
в плоском канале в компланарном магнитном поле 134

Спесивцев С.Е., Люлин Ю.В.
Экспериментальное исследование динамики разрыва тонкого слоя
жидкости в условиях точечного нагрева со стороны подложки 136

Сердюков В.С., Суртаев А.С., Чернявский А.Н.
Исследование особенностей теплообмена при кипении жидкости
с использованием ИК-съемки 138

Ситкин П.К., Клейманов Р.В., Коршунов А.В.
Высокотемпературный диэлектрический одноточечный
цилиндрический зонд для измерения полного давления и угла потока 140

Стерлягов А.Н., Шлюпиков М.Ю.
Исследование испарения капель водно-спиртового раствора
методом ИК-термографии 141

Томин А.С.
Получение гидрата метана низкотемпературной конденсацией
сверхзвуковых молекулярных пучков 143

Хажиев З.З., Леманов В.В.
Средние и пульсационные характеристики теплообмена
в импактной круглой струе 145

Шанин Ю.И., Черных А.В., Шарапов И.С.
Термодеформационные ограничения размеров дефектов
в лазерных оптических элементах 147

Шебелева А.А., Минаков А.В., Ягодницына А.А., Ковалёв А.В., Бильский А.В.
Расчетно-экспериментальное исследование режимов течения смеси
касторового и парафинового масел в микроканале Т-типа 149

Секция 5
ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА
В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Агапов К.В., Дуников Д.О.
Использование топливных элементов в энергетике 153

Агафонова Н.Д., Егоров М.Ю., Парамонова И.Л.,
Сергеев В.В., Федорович Е.Д.
Сравнение особенностей рабочих процессов в горизонтальных
и вертикальных парогенераторах АЭС с ВВЭР 155

Аксенов П.Л., Егоров М.Ю.
Интенсификация теплообмена в парогенераторе ПГВ-1000В АЭС 157

Ананьев П.А., Ленев С.Н., Голов П.В., Картуесова А.Ю., Брдынкевич Д.В.
Расчетно-экспериментальное исследование эффективности работы воздушно-конденсационной установки при высоких ветровых нагрузках с испытанием устройства полезного использования энергии ветра 159

Базюк С.С., Дерябин И.А., Ивонин Д.В., Лиханский В.В., Нужин В.Н., Солдаткин Д.М., Токарев С.А., Шевелева Ю.В.
Гидравлические характеристики водоохлаждаемого технологического канала для реактора ИВГ.1М..... 161

Базюк С.С., Дерябин И.А., Киселев С.Д., Кузма-Кичта Ю.А., Мокрушин А.А., Паршин Н.Я., Попов Е.Б., Солдаткин Д.М.
Коррозионные характеристики тугоплавкой оболочки твэла легководного реактора в условиях LOCA..... 164

Байрамуков А.Ш., Митрофанова О.В.
Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в переходных режимах работы судовых ядерно-энергетических установок (ЯЭУ)..... 167

Бердов Р.Д., Волков Н.Н., Волкова Л.И., Гурина И.Н., Миронов В.В.
Исследование процессов тепломассообмена в газодинамических трубах при истечении двухфазных продуктов сгорания из сопел больших степеней расширения 169

Бояркин М.С., Ковальногов В.Н.
Разработка и исследование технологии обогащения низкосортных твердых топлив рециркулируемыми уходящими газами для котельных установок 171

Волгин В.С., Гиневский А.Ф.
Исследование интегральных характеристик термоэлектрического охлаждающего модуля..... 173

Гавриш А.С., Шевченко А.Н., Мисюра Т.А.
О перспективах применения супергидрофобных поверхностей..... 175

Горский Ю.А., Плетнев А.А.
Численное моделирование тепловых режимов контейнера ТУК-109 при хранении и транспортировании ОЯТ реакторов РБМК-1000..... 177

Гришин Ю.А., Семенчукова В.С.
Моделирование нестационарного течения газа в системе «трубопровод—клапан—объем» 179

Давлетшин И.А., Паерелий А.А., Газизов И.М.
Теплоотдача пульсирующего потока в диффузоре 181

Жарков М.Ю., Соколов Д.О., Чан Б.Л.Х., Варава А.Н., Люблинский И.Е.
Инновационный способ решения проблем охлаждения и термостабилизации элементов токамаков с капиллярно-пористыми структурами..... 183

Жигарев В.А., Минаков А.В., Неверов А.Л.
Расчетно-экспериментальное исследование неньютоновских течений буровых растворов в скважинах..... 185

Зарубин В.С., Сергеева Е.С.
Влияние пористости нанокомпозита на его теплопроводность и термоупругие характеристики 187

Золотухин А.В.
Характеристика течения потока при обтекании сотовых поверхностей 189

Иванова В.А., Шайкина А.А.
Моделирование работы вихревой трубы на режиме реверса 191

Ильинков А.В., Щукин А.В., Хабибуллин И.И., Такмовцев В.В., Ахметшин Р.И.
Теплогидравлические характеристики двухполостной диффузорной выемки 193

Карлов С.П., Захаров Н.С., Некрасов Д.А., Резник В.В.
Исследование процессов тепло- и массопереноса в микроструктурированных средах и гелях 195

Колобаева П.В.
Верификация кода HYDRA-IBRAE/LM/V2 применительно к моделям переноса и осаждения продуктов деления в первом контуре РУ БН 197

Конюшин М.В., Федорович Е.Д., Сергеев В.В.
Опреснение морской воды на АЭС. Обзор опубликованных источников 199

Крайнова И.В., Чебаков Е.В.
Определение углового положения космического аппарата на основе определения внешнего теплового воздействия на аппарат 201

Кузнецов Г.В., Пискунов М.В., Стрижак П.А.
Интенсивное дробление капли воды при добавлении частицы графита 203

Лазаренко И.Н., Коновалов Д.А.
Конвективный стационарный перенос теплоты в микроканальных теплообменных элементах на основе матрицы из нитевидных монокристаллов кремния 205

Лазаренко И.Н., Коновалов Д.А., Кожухов Н.Н.
Исследование теплогидравлических характеристик микроканального теплообменника 207

Макаров М.С., Макарова С.Н., Шибаев А.А.
Численное моделирование энергоразделения в двухкаскадной трубе Леонтьева с центральным телом 209

Мартиросян А.А.
Исследование течения в первой ступени осевого компрессора высокого давления при использовании различных моделей турбулентности 211

Мильман О.О., Ленев С.Н., Голов П.В., Шифрин Б.А., Картуесова А.Ю.
Повышение эффективности воздушно-конденсационных установок и сухих градирен применением разноуровневой компоновки секций 213

Мильман О.О., Птахин А.В.
Переменные и пусковые режимы воздушных конденсаторов 215

Миронов В.В., Волкова Л.И., Волков Н.Н., Добриянов С.К., Баскаков В.Н., Турутько А.И.
Методика расчета теплового состояния композиционных материалов с покрытием из карбида кремния с учетом течения и испарения пленки оксида кремния 217

Мисник М.О., Неволин А.М., Плотников Л.В.
Оценка влияния конфигурации впускной системы ДВС на газодинамику и теплообмен на основе численного моделирования в стационарных условиях 219

Митяков В.Ю., Гусаков А.А., Митяков А.В., Сероштанов В.В., Башкатов А.В., Дымкин А.Н.
Аэродинамика профиля с интенсификаторами в виде сферических лунок 221

Михиенкова Е.И., Необъявляющий П.А., Филимонов С.А., Бойков Д.В.
Исследование и адаптация системы горячего водоснабжения промышленного производства 222

Моржухина А.В.
Экспериментально-теоретическое исследование ультрапористых теплозащитных материалов для аэрокосмической техники 224

Морозов А.В., Калякин Д.С., Питык А.В., Рагулин С.В.
Влияние параметров дополнительной системы залива активной зоны на накопление и кристаллизацию борной кислоты в реакторе ВВЭР в случае аварии 226

Мунц В.А., Волкова Ю.В., Ершов М.И., Плотников Н.С.
Расчет энергетического баланса системы на основе парового риформера природного газа, многопоточного теплообменника и батарей топливных элементов 228

Онищенко Д.О., Голосов А.С., Буданов Р.Е., Басов А.О.
Экспериментальное исследование рабочего процесса двухтактного карбюраторного двигателя 230

Онищенко Д.О., Корженевская И.А.
Исследование тепломассообмена в моторном отсеке автомобиля 232

Онищенко Д.О., Сафонов Р.А., Арутюнян Г.А.
Верификация расчетной модели термоэлектрического генератора для перспективного применения в составе ДВС 234

Онохин Д.А., Сабуров Э.Н.
Исследование конвективного теплообмена в относительно длинных циклонных камерах 236

Пальчековская Н.В.
Особенности сверхзвукового обтекания модели спускаемого космического аппарата 238

Пиралишвили Ш.А., Веретенников С.В.
Особенности конвективного теплообмена в ограниченных
и струйных закрученных течениях 240

Пиралишвили Ш.А., Родионов С.Г.
Разработка вихревой противоточной горелки для сжигания твердого
пылевидного топлива 242

Платонов Д.В., Минаков А.В., Дектерев Д.А.
Расчетно-экспериментальное исследование холостого пропуска
через гидроагрегат высоконапорной ГЭС 244

Пожилов А.А., Храбрый А.И.
Численное моделирование работы конденсатора контурной тепловой
трубы на основе гибридной «трехмерной/одномерной» модели 246

Поздеева И.Г., Митрофанова О.В.
К оценке энергетического баланса при переходе гидромеханической
системы к режиму резонансной неустойчивости 248

Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М.
Исследование эффекта аэродинамического охлаждения при сверхзвуковом
обтекании ребра 250

Протасов Н.О., Глазов В.С.
Оценка влияния рельефа наружного ограждения здания
на тепловые потери 252

Прохоров Д.А., Пиралишвили Ш.А.
Оптимизация геометрии проточной части вихревого газификатора
с целью совершенствования его рабочего процесса 254

Птахин А.В., Крылов В.С., Седов М.И., Кондратьев А.В.
Особенности промышленных испытаний сухих градирен
и воздушных конденсаторов 256

Ракитин А.С.
Особенности конвекции в криостате ВТСП трансформатора 258

Романов И.А., Казаков А.Н., Пыхтина А.И.
Влияние геометрии металлогидридной засыпки на ее
водородсорбционные свойства, масштабный эффект 259

Рудой И.А.
Оценка влияния коэффициентов математической модели
теплопереноса на выбор толщины многослойного разрушающегося
теплозащитного покрытия 261

Суранов Д.В., Ковальногов В.Н.
Численное моделирование и оптимизация потерь тепловой энергии
при транспортировании в энергетических системах 263

Счастливцев А.И., Назарова О.В.
Экспериментальное исследование процессов в водородно-воздушном газогенераторе 265

Талагаева А.С., Дорож Ю.С.
Отвод тепла от теплообменного оборудования транспортных паротурбинных установок с использованием естественной циркуляции 267

Тепляков Е.А., Царева К.В.
Передача тепла между твердыми телами при низких температурах 269

Фёдоров Р.В., Ковальногов В.Н., Чукалин А.В., Хахалева Л.В.
Численное исследование эффективности тепловой защиты поверхности, обтекаемой высокоскоростными потоками, за счет демпфирующих полостей 270

Фролко П.А., Шумаев В.В.
Тепловые аспекты работы источников плазмы геликонного типа 272

Цынаева А.А., Никитин М.Н., Цынаева Е.А.
Анализ теплогидравлической эффективности методов интенсификации температурной стратификации 274

Шанин Ю.И., Черных А.В., Шарапов И.С.
Тепловые задачи в элементах адаптивных оптических систем 276

Шкрыгунова Е.В., Парамонова И.Л.
Методика расчета теплообмена при частичном осушении активной зоны ВВЭР 278

Шкуратенко А.А.
Влияние гетерогенного катализа на теплообмен в химически активном пограничном слое 281

Круглый стол «2017 — год экологии»

Егоров М.Ю., Сергеев В.В., Федорович Е.Д.
Роль теплофизических факторов в возникновении и протекании аварии на ЧАЭС 285

Зайченко В.М.
Перспективные направления развития энергетики 287

Сальманов А.Б., Романова Л.В., Полозов А.В.
Природосберегающие технологии 289

Алфавитный указатель 291